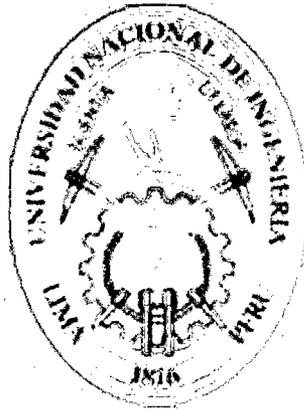


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
SECCIÓN DE POSTGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACIÓN



TESIS

**“ANÁLISIS DE LA CONVERSIÓN DE UN QUEMADOR
DE PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6 A GAS NATURAL PARA
REDUCIR COSTOS DE LA RECONVERSIÓN DE CALDERA EN
VOPAK SERLIPSA”**

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CON MENCIÓN EN:
APLICACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS NATURAL**

PRESENTADO POR:

ALBUJAR ESCUDERO MASÍAS GABRIEL, Y

CAPCHA SOTO RAÚL SPENSER

LIMA – PERÚ

2011

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

AGRADECIMIENTOS

Al Magister Javier Franco Gonzales, asesor de la tesis, por su constante preocupación, motivación y guía firme para finalizar la presente tesis.

Al Gerente General de la empresa Equipos Térmicos, Ing. Juan Vicente Queirolo del Río, visionario del desarrollo tecnológico de la combustión industrial y generación de calor en el Perú, por la confianza depositada y facilidades brindadas de sus instalaciones.

A los Doctores Gilberto Becerra, Guillermo Lira y Jonny Ñahui por su valioso aporte con las mejoras sugeridas al desarrollo de la presente tesis.

A la Sección de Postgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, por su alto grado de enseñanza y la cordialidad de su personal administrativo.

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, a mi señora Consuelo, a mis hijos Gabriel y Zahara por su comprensión y apoyo total a los largo del desarrollo de la maestría.

Masías Gabriel Albuja Escudero

A Dios, a mis padres y a mi hermana, por el apoyo incondicional y permanente durante el desarrollo de la maestría y finalización de la tesis.

Raúl Spenser Capcha Soto

RESUMEN

La presente investigación tuvo lugar en la empresa Vopak Serlipsa, que consistió en convertir un quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural, a fin de reducir los costos de la reconversión de la caldera pirotubular con una potencia neta de 1.961,98 kW.

La viabilidad técnica de la conversión del quemador se verificó calculando la eficiencia de la caldera, cuyo valor obtenido es de 81,925%, el cual está dentro del rango de las eficiencias aceptadas internacionalmente para calderas que operan con gas natural.

La reducción de costos de la reconversión de la caldera es del orden de 30% en comparación a la reconversión de la caldera usando quemador dedicado y obteniéndose un VAN de US\$ 201.641,02 y una TIR de 23,1%.

Finalmente la investigación demuestra que la reconversión de la caldera es posible realizar sin sustituir el quemador tal como se realiza la conversión de los vehículos con motores gasolineros.

Palabras Claves: Quemador mixto, llama, eficiencia, caldera pirotubular, tren de válvulas, chaqueta de inyección de gas, hogar, aire de combustión.

ABSTRACT

This research took place in The Company Vopak Serlipsa, which consisted of converting an industrial oil burner N° 6 natural gas in order to reduce the costs of the conversion of the boiler pirotubular with a net capacity of 1961.98 kW.

The technical feasibility of the conversion burner was verified by calculating the boiler efficiency, the value obtained is 81.925%, which is within the range of internationally accepted efficiencies for boilers operating on natural gas.

Reducing costs of conversion of the boiler is about 30% compared to the conversion of the boiler burner using dedicated and yielding a NPV 201,641.02 and an IRR of 23.1%.

Finally the research shows that the conversion of some boilers is possible without replacing the burner as converting from Gasoline engine vehicles

Keywords: Mixed burner, flame, efficiency, boiler pirotubular, valves train, gas injection jacket, furnace, combustion air.

INDICE

Resumen	iv
Abstract	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENÉRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1 Problemática	3
1.1.1 Estudios a nivel nacional	5
1.1.2 Estudios a nivel internacional	6
1.1.3 Planteamiento del Problema	6
1.2 Objetivo de la tesis.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Formulación de la hipótesis	7
1.4 Variables e indicadores	8
1.5 Metodología y nivel de investigación.....	8
1.6 Importancia	9
1.6.1 Tecnológica.....	9
1.6.2 Económica	9
1.6.3 Ambiental.....	9
1.6.4 Limitaciones.....	10
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	11
2.1 Combustibles	11
2.1.1 Clasificación de los combustibles.....	12

2.1.1.1	Madera y residuos vegetales	12
2.1.1.2	Turbas	13
2.1.1.3	Lignitos	13
2.1.1.4	Hullas	13
2.1.1.5	Antracita.....	13
2.1.1.6	Combustibles sólidos artificiales	13
2.1.1.7	Diesel 2 y petróleos industriales	14
2.1.1.8	Combustibles líquidos residuales.....	14
2.1.1.9	Gas natural	14
2.1.1.10	Gases licuados de petróleo (G.L.P.).....	14
2.1.2	Combustibles líquidos.....	14
2.1.3	Propiedades de los combustibles líquidos industriales	15
2.1.3.1	Densidad	15
2.1.3.2	Viscosidad.....	16
2.1.3.3	Poder calorífico.....	19
2.1.3.4	Análisis elemental.....	20
2.1.3.5	Temperatura de inflamación	21
2.1.3.6	Temperatura de ignición	22
2.1.3.7	Contenido de agua y sedimentos	22
2.1.4	Combustibles gaseosos	23
2.1.5	Propiedades de los combustibles gaseosos	24
2.1.5.1	Condiciones normales.....	24
2.1.5.2	Condiciones estándar	25
2.1.5.3	Metro cúbico normal.....	25

2.1.5.4	Metro cúbico estándar.....	25
2.1.5.5	Densidad Absoluta.....	25
2.1.5.6	Densidad relativa	26
2.1.5.7	Poder calorífico.....	26
2.1.5.8	Temperatura de ignición.....	27
2.1.5.9	Limites de inflamabilidad	27
2.1.5.10	Intercambiabilidad de los gases combustibles	29
2.1.6	Análisis del combustible- Cromatografía	31
2.2	Combustión.....	31
2.2.1	Definiciones básicas	33
2.2.1.1	Mol.....	33
2.2.1.2	Fracción molar	33
2.2.1.3	Masa Molecular de una mezcla gaseosa.....	34
2.2.2	Aire	35
2.2.3	Aire Húmedo.....	36
2.2.4	Combustión completa.....	39
2.2.5	Combustión incompleta.....	39
2.2.6	Índice o coeficiente de exceso de aire (λ).....	39
2.2.6.1	Combustión estequiométrica ($\lambda = 1$).....	40
2.2.6.2	Combustión con defecto de aire ($\lambda < 1$).....	40
2.2.6.3	Combustión con exceso de aire ($\lambda > 1$).....	41
2.2.7	Química de la combustión	42
2.2.8	Aire de Combustión.....	45
2.2.9	Gases de combustión (flue gas)	48

2.2.10	Características de llama	53
2.2.10.1	Definición	53
2.2.10.2	Emisividad de llama.....	54
2.2.10.3	Tamaño de llama.....	55
2.3	Calderas	56
2.3.1	Definición	56
2.3.2	Clasificación de calderas	57
2.3.2.1	Calderas pirotubulares	58
2.3.2.2	Calderas acuotubulares	58
2.3.2.3	Calderas de resistencias eléctricas	59
2.3.3	Otras formas de clasificar las calderas.....	60
2.3.3.1	Según la circulación de los fluidos	60
2.3.3.2	Según la transmisión de calor	60
2.3.3.3	Según el combustible utilizado	61
2.3.3.4	Según el tiro	61
2.3.3.5	Según el lugar de montaje.....	61
2.3.3.6	Según su implantación	62
2.3.3.7	Según su ubicación	62
2.3.3.8	Según su operación	62
2.3.3.9	Según el medio de transporte de calor	63
2.3.4	Calderas especiales	64
2.3.4.1	Caldera del tipo llama reversa	64
2.3.4.2	Caldera de flujo forzado	65
2.3.5	Características fundamentales para definir una caldera de vapor.....	66

2.3.6	Caldera pirotubular	66
2.3.6.1	Número de pasos.....	66
2.3.6.2	Partes de una caldera pirotubular.....	67
2.3.7	Controles de una caldera.....	74
2.3.7.1	Control de nivel	76
2.3.7.2	Presostato de seguridad.....	76
2.3.7.3	Presostato de modulación	79
2.3.7.4	Control de nivel mínimo por electrodos	78
2.3.7.5	Válvula de seguridad	78
2.3.7.6	Manómetro principal.....	79
2.3.7.7	Termómetro de gases	79
2.4	Quemadores	80
2.4.1	Definiciones importantes	80
2.4.1.1	Quemador automático.....	80
2.4.1.2	Quemadores semiautomáticos	80
2.4.1.3	Quemadores manuales	81
2.4.1.4	Quemador de aire forzado.....	81
2.4.1.5	Quemador mixto	81
2.4.1.6	Quemador con premezclado en cabeza.....	81
2.4.1.7	Condiciones de referencia.....	81
2.4.1.8	Puesta fuera de servicio	81
2.4.1.9	Rearranque	82
2.4.1.10	Reencendido.....	82
2.4.1.11	Tiempo de prebarrido.....	82

2.4.1.12	Tiempo de encendido.....	82
2.4.1.13	Tiempo de seguridad de arranque.....	82
2.4.1.14	Tiempo de postbarrido.....	82
2.4.1.15	Tiempo de espera.....	83
2.4.1.16	Piloto continuo.....	83
2.4.1.17	Piloto intermitente.....	83
2.4.1.18	Piloto interrumpido.....	83
2.4.1.19	Barrido.....	83
2.4.1.20	Prebarrido.....	83
2.4.1.21	Posbarrido.....	84
2.4.1.22	Dispositivo de control de llama.....	84
2.4.1.23	Dispositivo de mando.....	84
2.4.1.24	Auto verificación.....	84
2.4.1.25	Válvula automática de cierre.....	84
2.4.1.26	Consumo volumétrico.....	85
2.4.1.27	Consumo volumétrico nominal.....	85
2.4.1.28	Estabilidad de llama.....	85
2.4.1.29	Desprendimiento de llama.....	85
2.4.1.30	Retroceso de llama.....	86
2.4.2	Definición del quemador.....	86
2.4.3	Funciones del quemador.....	86
2.4.4	Clasificación de quemadores.....	87
2.4.4.1	De acuerdo con el combustible.....	87
2.4.4.2	Desde el punto vista de los hogares.....	87

2.4.4.3	Por la forma constructiva.....	88
2.4.4.4	Por la duración del servicio	88
2.4.4.5	Por la admisión del aire	88
2.4.4.6	Atendiendo a la mezcla de combustible y comburente.....	88
2.4.4.7	Desde el punto de vista de su funcionamiento.....	88
2.4.4.8	Desde el punto de regulación.....	88
2.4.5	Parámetros de los Quemadores.....	89
2.4.5.1	Potencia térmica o potencia nominal	89
2.4.5.2	Modulación del quemador	89
2.4.5.3	Tiempo de combustión.....	89
2.4.5.4	Impulsión	89
2.4.5.5	Potencia específica.....	90
2.4.6	Criterios de selección de quemadores.....	90
2.4.7	Quemadores para combustibles líquidos	90
2.4.7.1	Quemadores de una etapa (On-Off).....	91
2.4.7.2	Quemador tipo bajo/alto/bajo fuego	95
2.4.7.3	Quemador modulante.....	95
2.4.7.4	Diagrama de flujo de un quemador modulante.....	96
2.4.7.5	Partes de un quemador modulante	99
2.4.8	Quemador para combustible gaseoso	108
2.4.8.1	Quemadores de una etapa (on-off).....	109
2.4.8.2	Quemador tipo bajo/alto/bajo fuego	112
2.4.8.3	Quemador modulante.....	113
2.4.8.4	Diagrama de flujo de un quemador Modulante	114

2.4.8.5	Partes de un quemador modulante	116
2.4.8.6	Quemador mixto	120
2.4.8.7	Secuencia de Funcionamiento	120
2.5	Eficiencia de una caldera	122
2.5.1	Eficiencia de combustión.....	124
2.5.2	Eficiencia térmica	125
2.5.3	Eficiencia de la caldera.....	125
2.5.4	Determinación de la eficiencia de la caldera	126
2.5.4.1	Método Directo	127
2.5.4.2	Método Indirecto.....	127
2.6	Tren de válvulas de gas.....	129
2.6.1	Definición	129
2.6.2	Normas.....	130
2.6.3	Configuraciones del tren de válvulas.....	130
2.6.3.1	Componentes del Tren de válvulas.....	132
2.6.4	Dimensionamiento	133
2.6.4.1	Cálculo de la velocidad de circulación	133
2.6.4.2	Cálculo de diámetro de las tuberías	133
2.6.4.3	Cálculo de la caída de presión	134
2.7	Estación de Regulación Secundaria.....	134
2.7.1	Definición	134
2.7.2	Regulador de presión	135
2.7.3	Partes de una Estación de Regulación Secundaria.....	135
2.7.4	Parámetros para selección y dimensionamiento	137

2.7.4.1	Parámetros para la selección de la Válvula Reguladora.....	137
2.7.4.2	Diámetro de tubería y válvulas de bloqueo	138
2.7.5	Recomendaciones para su instalación.....	138
CAPÍTULO III: CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE APARATOS.....		139
3.1	Introducción.....	139
3.2	Toma de datos de campo	139
3.2.1	Instalación Interna.....	139
3.2.2	Datos de la caldera y quemador.....	141
3.2.3	Datos operativos	141
3.2.4	Contrapresión del hogar.....	142
3.2.5	Pérdidas de gases de combustión.....	143
3.2.6	Medidas de la Caldera.....	144
3.2.7	Medidas del Cañón del Quemador.....	147
3.2.8	Medidas del Cono Refractario	147
3.2.9	Lista de partes del quemador actual.....	147
3.2.9.1	Partes del Quemador.....	147
3.2.9.2	Controles de combustión y panel de control.....	149
3.2.10	Diagrama de flujo del quemador actual.....	149
3.3	Cálculos	151
3.3.1	Cálculo de la eficiencia de la caldera.....	151
3.3.2	Cálculo del consumo de petróleo industrial N° 6	151
3.3.3	Cálculo del consumo de gas natural	152
3.3.4	Cálculo del aire de combustión para petróleo industrial N° 6.....	153
3.3.5	Cálculo del aire teórico y real de combustión para gas natural	154

3.3.6	Evaluación del ventilador de aire de combustión	155
3.3.7	Cálculos de gases generados en la combustión de petróleo industrial ...	156
3.3.8	Cálculos de los gases generados en la combustión del gas natural	157
3.3.9	Evaluación de la cantidad de gases de combustión generados	157
3.3.10	Cálculo de las dimensiones teóricas de llama y evaluación del tamaño del hogar	158
3.3.10.1	Cálculo de dimensiones de llama.....	158
3.3.10.2	Evaluación del tamaño del hogar.....	159
3.3.11	Calculo de temperaturas al final del hogar	159
3.3.11.1	Cálculo de la temperatura (T) con petróleo industrial N° 6.....	160
3.3.11.2	Cálculo de la temperatura (T) con gas natural.....	160
3.3.12	Dimensionamiento de la chaqueta de inyección.....	161
3.3.12.1	Cálculo del diámetro y del número de agujeros	163
3.3.12.2	Cálculo de la caída de presión	164
3.3.13	Dimensionamiento del Tren de Válvulas.....	166
3.3.14	Dimensionamiento de la Estación de Regulación Secundaria.....	171
3.4	Implementación	173
3.4.1	Modificación electromecánica.....	173
3.4.1.1	Modificación mecánica.....	173
3.4.1.2	Modificación eléctrica	174
3.4.2	Ejecución	175
3.4.2.1	Lista de partes del quemador mixto.....	179
3.4.3	Operación y toma de datos.....	181
3.4.4	Toma de medidas y recálculo de la eficiencia después de la conversión	182

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN ECONÓMICA	185
4.1 Costos.....	185
4.1.1 Consumo y precio de combustible.....	185
4.1.2 Costos de operación y mantenimiento	186
4.2 Evaluación de opciones	187
4.2.1 Opción I - Quemador nuevo	188
4.2.2 Opción II – Reconversión de quemador	190
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	193
CONCLUSIONES.....	196
RECOMENDACIONES	198
BIBLIOGRAFÍA.....	200
ANEXOS.....	204

TABLAS

Tabla N° 1.1	Proyectos de Investigación de conversión de calderas a Nivel Nacional	5
Tabla N° 1.2	Proyectos de Investigación a Nivel Internacional	6
Tabla N° 2.1	Combustibles Industriales	12
Tabla N° 2.2	Grados API de Combustibles líquidos (15.6°C)	16
Tabla N° 2.3	Tabla de Temperatura de Bombeo y atomización.....	17
Tabla N° 2.4	Viscosidad de los combustibles líquidos.....	19
Tabla N° 2.5	Poder Calorífico	20
Tabla N° 2.6	Poder calorífico Promedio del Petróleo Industrial N° 6.....	20
Tabla N° 2.7	Análisis elemental de petróleo 6, R500 y Diesel 2.....	21
Tabla N° 2.8	Temperatura de inflamación de combustibles líquidos.....	21
Tabla N° 2.9	Temperatura de Ignición para diversos combustibles	22
Tabla N° 2.10	Composición del Gas Natural.....	24
Tabla N° 2.11	Propiedades de los gases combustibles	27
Tabla N° 2.12	Temperatura de ignición de los gases.....	27
Tabla N° 2.13	Limite de inflamabilidad de gases combustibles.....	28
Tabla N° 2.14	Clasificación de gases en familias.....	30
Tabla N° 2.15	Presiones de utilización según familia de gases.....	30
Tabla N° 2.16	Análisis Cromatográfico del Gas Natural de Camisea.....	31
Tabla N° 2.17	Composición del aire atmosférico	36
Tabla N° 2.18	Valores prácticos adoptados para la composición del aire.....	36

Tabla N° 2.19	Presión del vapor de agua en función de la temperatura, en estado de saturación	38
Tabla N° 2.20	Clasificación de la Combustión.....	40
Tabla N° 2.21	Índice de aire o coeficiente de exceso de aire	47
Tabla N° 2.22	Temperaturas de la llama para diversos combustibles	53
Tabla N° 2.23	Temperaturas que corresponden a los colores de la llama	54
Tabla N° 2.24	Factor de emisividad de combustibles.....	55
Tabla N° 2.25	Valores Típicos de [CO ₂]MAX	128
Tabla N° 3.1	Medición de de Contrapresión	142
Tabla N° 3.2	Medición de pérdidas de gases de combustión en operación.....	143
Tabla N° 3.3	Medición de pérdidas de gases de combustión después del deshollinado.....	144
Tabla N° 3.4	Medidas geométricas de la caldera.....	145
Tabla N° 3.5	Partes del Quemador	148
Tabla N° 3.6	Partes de Control de combustión y panel de control	149
Tabla N° 3.7	Requerimiento de aire de combustión	156
Tabla N° 3.8	Comparación de dimensiones de Hogar y de llama	159
Tabla N° 3.9	Cálculos de la Chaqueta de inyección de gas natural.....	166
Tabla N° 3.10	Lista de Partes del Tren de válvulas.....	167
Tabla N° 3.11	Planilla de cálculo del tren de válvulas	170
Tabla N° 3.12	Lista de Partes de la Estación de Regulación Secundaria	173
Tabla N° 3.13	Partes del Quemador mixto reconvertido	179
Tabla N° 3.14	Parámetros operativos	182

Tabla N° 3.15	Primera medición de pérdidas de gases de combustión y Eficiencia en base al PCS.....	183
Tabla N° 3.16	Segunda medición de pérdidas de gases de combustión y Eficiencia en base al PCI.....	183
Tabla N° 4.1	Consumo de combustible	185
Tabla N° 4.2	Precio del Petróleo Industrial N° 6 y del Gas natural.....	186
Tabla N° 4.3	Costos de operación y mantenimiento de caldera con petróleo industrial N° 6	186
Tabla N° 4.4	Costos de operación y mantenimiento de caldera con gas natural .	187
Tabla N° 4.5	Inversión y ahorro para Quemador de gas natural nuevo.....	188
Tabla N° 4.6	Flujo de caja con quemador nuevo.....	189
Tabla N° 4.7	Inversión y ahorro para conversión del quemador	190
Tabla N° 4.8	Flujo de caja con conversión de quemador	191
Tabla N° 4.9	Indicadores económicos	192
Tabla N° 5.1	Eficiencias (%) de calderas modelo CBR a gas natural	193
Tabla N° 5.2	Contrastación de Hipótesis.....	194

FIGURAS

Figura N° 1.1	Estructura del consumo final de energía secundaria	4
Figura N° 2.1	Viscosidad de diversos tipos de petróleo	18
Figura N° 2.2	Triángulo de la Combustión.....	32
Figura N° 2.3	Caldera pirotubular de tres pasos	57
Figura N° 2.4	Caldera pirotubular de 4 pasos	58
Figura N° 2.5	Caldera Acuotubular tipo D	59
Figura N° 2.6	Caldera de resistencias eléctricas	59
Figura N° 2.7	Caldera de llama reversa	64
Figura N° 2.8	Caldera de vapor de flujo forzado	65
Figura N° 2.9	Caldera pirotubular de tres pasos	67
Figura N° 2.10	Caldera pirotubular de dos pasos.....	68
Figura N° 2.11	Casco de caldera pirotubular	69
Figura N° 2.12	Placa posterior	70
Figura N° 2.13	Placa delantera.....	70
Figura N° 2.14	Hogar liso con refuerzo	71
Figura N° 2.15	Cono refractario.....	71
Figura N° 2.16	Cámara de hogar.....	72
Figura N° 2.17	Controles de una Caldera pirotubular de gas natural	75
Figura N° 2.18	Control de nivel MDM modelo 157.....	76
Figura N° 2.19	Presostato L404 F	77
Figura N° 2.20	Reostato L91B.....	77
Figura N° 2.21	Porta electrodo.....	78

Figura N° 2.22 Relay eléctrico	78
Figura N° 2.23 Válvula de seguridad	78
Figura N° 2.24 Manómetro principal	79
Figura N° 2.25 Termómetro de gases.....	79
Figura N° 2.26 Quemador Autoquem	86
Figura N° 2.27 Transformador de ignición	91
Figura N° 2.28 Electrodo de encendido	91
Figura N° 2.29 Diagrama de flujo de un quemador de una etapa (on –off).....	92
Figura N° 2.30 Bomba de petroleo.....	93
Figura N° 2.31 Tobera de atomizacion	93
Figura N° 2.32 Difusor.....	94
Figura N° 2.33 Quemador diesel 2.....	94
Figura N° 2.34 Controlador de encendido	94
Figura N° 2.35 Sensor de llama fotoresistiva.....	94
Figura N° 2.36 Quemador carlin de dos llamas	95
Figura N° 2.37 Quemador modulante Equipos Térmicos.....	96
Figura N° 2.38 Diagrama de flujo de un quemador Modulante.....	98
Figura N° 2.39 Cañón del quemador.....	99
Figura N° 2.40 Difusores de aire.....	99
Figura N° 2.41 Válvula hauck.....	100
Figura N° 2.42 Electroválvula Asco	100
Figura N° 2.43 Tobera Monarch C169 WA.....	101
Figura N° 2.44 Piloto de encendido	101
Figura N° 2.45 Transformador de ignición	102

Figura N° 2.46 Modutrol M9184	102
Figura N° 2.47 Ventiladores centrífugos.....	103
Figura N° 2.48 Presostato de aire.....	103
Figura N° 2.49 Bomba 2AM03 roper.....	104
Figura N° 2.50 Bombas tuthil	104
Figura N° 2.51 Válvula Flulflo	104
Figura N° 2.52 Termostato.....	105
Figura N° 2.53 Compresora de Atomización	106
Figura N° 2.54 Presostato de atomización	107
Figura N° 2.55 Fotocelda C7027.....	107
Figura N° 2.56 Programador RM7840L	108
Figura N° 2.57 Quemador Wayne.....	109
Figura N° 2.58 Quemador Eqa.....	109
Figura N° 2.59 Diagrama de flujo de un quemador de una etapa	110
Figura N° 2.60 Controlador de encendido	111
Figura N° 2.61 Difusor.....	111
Figura N° 2.62 Electrodo de ionizacion, difusor e inyector de gas.....	112
Figura N° 2.63 Quemador Power flame tipo bajo/alto/bajo fuego.....	113
Figura N° 2.64 Quemador modulante Saacke.....	113
Figura N° 2.65 Diagrama de flujo de un quemador de gas modulante	115
Figura N° 2.66 Cañón del quemador cortesía Wheishaupt	116
Figura N° 2.67 Difusor de Aire quemador Autoquem.....	116
Figura N° 2.68 Válvula controladora de caudal de gas Eqa.....	117
Figura N° 2.69 Tren o ramal de válvulas	118

Figura N° 2.70	Esquema térmico de un equipo de combustión	123
Figura N° 2.71	flujo de calor en una caldera.....	124
Figura N° 2.72	Determinación de las pérdidas por humos	128
Figura N° 2.73	Tren de válvulas de combustión Equipos Térmicos.....	129
Figura N° 2.74	Esquema de Tren de válvulas según FM y IRI	130
Figura N° 2.75	Componentes del Tren de Válvulas.....	132
Figura N° 2.76	Estación de Regulación Secundaria	135
Figura N° 2.77	Partes de una Estación de Regulación Secundaria	136
Figura N° 3.1	Diagrama de flujo de la Instalación interna de Gas Natural.....	140
Figura N° 3.2	Medición de la contrapresión	142
Figura N° 3.3	Placa portatubos	145
Figura N° 3.4	Medidas geométricas del hogar.....	146
Figura N° 3.5	Cañón del Quemador.....	147
Figura N° 3.6	Cono refractario.....	147
Figura N° 3.7	Diagrama de Flujo	150
Figura N° 3.8	Cañón de quemador con Chaqueta externa	162
Figura N° 3.9	Cañón de quemador con Chaqueta interna.....	163
Figura N° 3.10	Diámetros para inyección de aire	164
Figura N° 3.11	Configuración de Tren de válvulas	167
Figura N° 3.12	Diagrama P&D del Tren de válvulas	168
Figura N° 3.13	Partes del Tren de válvulas.....	169
Figura N° 3.14	Válvula Eqa modelo 217	172
Figura N° 3.15	Diagrama de la Estación de Regulación Secundaria	172
Figura N° 3.16	Cañón, agujeros de inyección y cono refractario	174

Figura N° 3.17 Caldera reconvertida a gas natural	176
Figura N° 3.18 Quemador convertido mixto.....	177
Figura N° 3.19 Diagrama de Flujo del Quemador convertido	178

LISTA DE SÍMBOLOS

I. SÍMBOLOS

A	Área
A_r	Superficie de radiación de cámara seca
B	Consumo de combustible equivalente al petróleo industrial N° 6.
C_d	Coefficiente de descarga de orificio
d	Diámetro interior
D	Diámetro exterior
e	Porcentaje de exceso de aire
g	Gravedad específica del gas, en condiciones estándar
L	Longitud
m	Masa
m_{atf}	Masa del aire teórico por masa de combustible (relación aire/combustible)
m_{gf}	Masa de gases de combustión por masa de combustible
\dot{m}	Flujo másico
\dot{m}_a	Flujo másico del aire
\dot{m}_f	Flujo másico de combustible
\dot{m}_g	Flujo másico de gases de combustión
\dot{m}_{gn}	Flujo másico de gas natural
\dot{m}_i	Masa de la sustancia i
M_i	Masa molecular de la sustancia i
n_i	Número de moles de la sustancia
p	Presión
p_i	Presión parcial

p_s	Presión parcial de vapor saturado
p_{cc}	Contrapresión de la cámara
PC	Poder calorífico
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
\dot{Q}	Calor
\dot{Q}_a	Calor absorbido o calor útil
\dot{Q}_c	Calor de combustible o calor suministrado
\dot{Q}_{cro}	Calor perdido por conducción, radiación y otros
\dot{Q}_g	Calor perdido en los gases de chimenea
\dot{Q}_i	Calor perdido por inquemados sólidos y gaseosos
\dot{Q}_p	Calor de pérdidas
\dot{Q}_q	Calor de combustión
T	Temperatura
v	Velocidad
V	Volumen
\dot{V}	Flujo volumétrico
V_{at}	Volumen de aire teórico
\dot{V}_{at}	Flujo volumétrico de aire teórico
V_{af}	Volumen del aire real por masa o volumen de combustible
V_{atf}	Volumen de aire teórico por masa o volumen de combustible (relación aire combustible)
V_{ar}	Volumen de aire real
\dot{V}_{ar}	Flujo volumétrico del aire real
V_{gf}	Gases de combustión en volumen por unidad de combustible

\dot{V}_g	Flujo volumétrico de gases de combustión
\dot{V}_{gn}	Flujo volumétrico de gas natural
V_H	Volumen húmedo
\bar{x}	Fracción molar
W_s	Índice de Wobbe
ε	Factor de emisividad
η_c	Eficiencia de combustión
η	Eficiencia de la caldera
η_t	Eficiencia térmica
η_{pcs}	Eficiencia de la caldera en base a PCS
η_{pci}	Eficiencia de la caldera en base a PCI
λ	Coefficiente de exceso de aire
$(A/F)_m$	Relación aire combustible expresado en masa
$(A/F)_v$	Relación aire combustible expresado en volumen
ρ	Densidad absoluta
ρ_s	Densidad relativa
ρ_a	Densidad del aire
ρ_{an}	Densidad del aire a condiciones normales
ρ_f	Densidad de combustible
ϕ	Humedad relativa
ω	Humedad absoluta
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
$^{\circ}\text{F}$	Grados Fahrenheit
Δp	Caída de presión a través del orificio

II. SUBÍNDICES

<i>a</i>	Aire
cro	Conducción, radiación y otros
f	Combustible
g	Gases de chimenea
gn	Gas natural
H	Húmedo
p	Pérdidas
q	Combustión
r	Real
s	Relativa, superior
t	Térmica
	Teórico
<i>y</i>	Índice de cantidad de hidrógeno
<i>x</i>	Índice de cantidad de carbono

INTRODUCCIÓN

Con la llegada del gas natural de Camisea a Lima y a algunas ciudades de nuestro país, es de necesidad nacional impulsar su uso masivo, antes que su exportación; debido a sus múltiples ventajas, tales como: su bajo precio, fácil combustión, su limpieza y porque el Perú es un país importador de hidrocarburos, a un precio notoriamente mucho mayor que el gas natural.

El crecimiento económico que acontece en el Perú, la competencia global a la que hemos ingresado obliga a que las industrias optimicen sus procesos y busquen reducir sus costos. Siendo el gas natural un combustible de bajo costo y cuya participación en el balance energético nacional aun es mínima; al mismo tiempo vemos que las industrias nacionales generan calor para sus diversos procesos en base a los derivados del petróleo a un costo marcadamente mayor en comparación al gas natural, con lo que pierden competitividad respecto a sus pares de otros países.

Dado el escenario mostrado anteriormente, aquellas empresas industriales que tienen el privilegio de acceder a las redes existentes de gas natural en Lima y Callao están realizando la adecuación de sus plantas al uso de gas natural por simple sustitución de quemadores de combustibles líquidos por quemadores nuevos para gas natural, incurriendo en mayores costos.

El presente trabajo de investigación demuestra la viabilidad técnica y económica de convertir quemadores de petróleo industrial N° 6 al uso de gas natural, para lo cual nos hemos propuesto como objetivo general: Analizar la conversión de un quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural a fin de reducir costos de la

reconversión de caldera de la empresa Vopak Serlipa en la Provincia Constitucional del Callao.

La presente investigación se ha estructurado en 5 capítulos que a continuación se detallan:

En el Capítulo I, se presenta la problemática, los objetivos, las hipótesis, las variables, la metodología empleada y la importancia de la investigación.

El Capítulo II cubre el fundamento teórico necesario para el desarrollo y concepción de la conversión del quemador, considerando los siguientes temas: combustibles, combustión, calderas, quemadores, eficiencia, tren de válvulas y la estación de regulación secundaria.

En el Capítulo III, se realiza el proceso de mediciones, cálculos y ejecución de la conversión del quemador. Se presentan los criterios para el diseño y selección de equipos, basados en normas nacionales e internacionales.

El Capítulo IV corresponde a la evaluación económica, comparando la conversión del quemador versus la sustitución por quemador nuevo, resaltando los ahorros esperados, el valor actual neto y la tasa interna de retorno.

En el Capítulo V, se discuten los resultados obtenidos y se contrasta las hipótesis planteadas.

Finalmente, se presentan las conclusiones sobre la investigación e implementación del presente trabajo y las recomendaciones que se deben tener en cuenta para futuros trabajos.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENÉRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA

La puesta en operación comercial del proyecto Camisea nos llenó de regocijo a todos los Peruanos, especialmente a todos los involucrados en el tema energético, más aún a los consumidores limeños de hidrocarburos líquidos como fuente de calor.

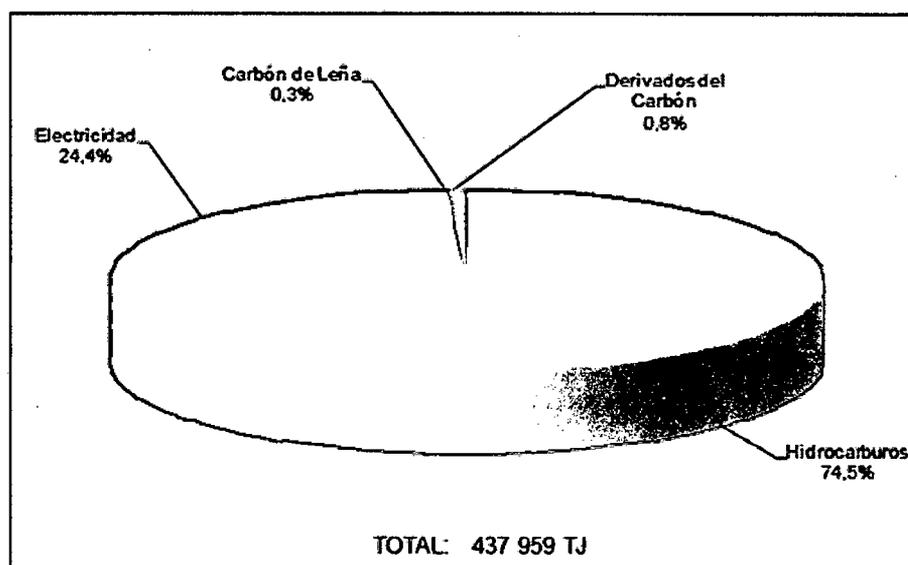
Siendo el gas natural fuente de elevado valor energético a un precio bajo se convierte en la mejor alternativa como combustible para la generación de calor, para todos aquellos consumidores que son viables de conectarse a las redes de Calidda. Es así como aparece el negocio de las Instalaciones Industriales de Gas Natural, que en esencia se trata de reconvertir las calderas y hornos al uso de gas natural. Los actores principales de estas conversiones son las Empresas Instaladoras de gas natural categoría I-G3, que conocen a cabalidad la ejecución de: las acometidas, estaciones de regulación y medición primarias, redes internas de acero o polietileno y estaciones de regulación secundaria, pero sus dificultades aparecen cuando les toca intervenir al propio sistema de combustión. En este punto el Instalador tiene dos alternativas a mencionar: la primera es la sustitución del quemador es decir cambio del quemador existente de combustible líquido por un quemador nuevo a gas natural o mixto; y la segunda alternativa que es la de convertir el quemador existente al uso de gas natural.

En nuestro País no hay instituciones que se encarguen de preparar ingenieros y/o técnicos expertos en el diseño y construcción de quemadores, calderas, y sistemas de combustión; inclusive el tema de combustibles y su combustión solo se

desarrolla en uno o dos capítulos de los cursos de termodinámica en la mayoría de nuestras Universidades. El instalador consciente de sus limitaciones técnicas siempre opta por la sustitución de quemadores con relativo éxito, ya que en la mayoría de las veces tiene dificultades operativas por una incorrecta selección y adaptación del quemador a la caldera.

En ese sentido, creemos que debemos analizar y desarrollar la segunda alternativa que es la de convertir los quemadores existentes al uso de gas natural ya que ello permitiría reducir los costos de la reconversiones de las calderas, así como también tendríamos una oportunidad de desarrollo tecnológico en el campo de la combustión industrial siendo esto fundamental para un país como el nuestro cuya dependencia de la energía térmica es cercana al 75% como lo muestra nuestro balance nacional energía (Ver Figura 1.1).

Figura N° 1.1 Estructura del consumo final de energía secundaria



Fuente: MINEM- Balance Nacional de Energía de Perú 2008

1.1.1 ESTUDIOS A NIVEL NACIONAL

A nivel nacional se observa que hay poca investigación sobre conversión de quemadores de combustibles líquidos para el uso del gas natural, los estudios encontrados se limitan a selección y reemplazo del quemador, lo cual genera elevados costos de conversión. No se ha encontrado trabajos sobre modificación de ingeniería en el quemador original que permita convertirlo para el uso del gas natural en las calderas (Ver Tabla N° 1.1).

Tabla N° 1.1 Proyectos de Investigación de conversión de calderas a Nivel Nacional

Ítem	Título	Autor	Ubicación
1	Proyecto de sustitución de quemadores de petróleo industrial por quemadores a gas natural en calderos pirotubulares.	Armas Romero Carlos Edward	Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.
2	Instalación interna de suministro de gas natural para dos calderos de 600 Bhp	Marienella Espinoza R.	Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.
3	Conversión de caldera de petróleo industrial R-500 a gas natural en una planta textil	Ponte Morillo, Juan Jose	Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería

1.1.2 ESTUDIOS A NIVEL INTERNACIONAL

Se ha encontrado un resumen del estudio de reconversión de calderas de fuel - oil a gas natural en el cual no se especifica la forma de reconversión de la caldera y sólo presenta la medición de los parámetros de eficiencia térmica (Ver Tabla N° 1.2).

Tabla N° 1.2 Proyecto de Investigación a Nivel Internacional

Ítem	Título	Autor	Ubicación
1	Reconversión de calderas de fuelóleo a gas natural	Franco Peña Fernandez	Ingenieros Industriales. País: Vasco

1.1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿En qué medida el análisis de la conversión de un quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural, permitirá reducir costos de la reconversión de caldera de la empresa Vopak Serlipsa en la Provincia Constitucional del Callao?

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la conversión del quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural a fin de reducir costos de la reconversión de caldera de la empresa Vopak Serlipsa en la Provincia Constitucional del Callao.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar las características constructivas y de funcionamiento de los quemadores de petróleo industrial N° 6 y de gas natural.
2. Determinar la modificación electromecánica de los quemadores de petróleo industrial N° 6 en base a los cálculos de combustión, a fin de operar adecuadamente con gas natural.
3. Calcular las eficiencias de operación de la caldera tanto a gas natural y petróleo industrial N° 6.
4. Cuantificar el costo de la reconversión de calderas a gas natural vía conversión de quemador y sustitución de quemador nuevo.

1.3 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

HIPÓTESIS GENERAL

El análisis de la conversión del quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural permite reducir costos de la reconversión de caldera de la empresa Vopak Serlipa en la Provincia Constitucional del Callao.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

1. Es posible realizar la modificación electromecánica del quemador de petróleo industrial N° 6 para su uso con gas natural.
2. La eficiencia de la caldera con quemador convertido es similar a la eficiencia de la caldera que opera con quemador nuevo.

1.4 VARIABLES E INDICADORES

Variable dependiente (V.D.):

- Reducir el costo de la reconversión de la caldera.

Variable independiente (V.I.):

- Conversión de quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural.

Indicadores de la variable dependiente:

- Valor Actual Neto (VAN) más alto.
- Tasa Interna de Retorno > Tasa de descuento (12%).

Indicadores de la Variable Independiente:

- Eficiencia de la caldera está entre: 81,7% - 82,2%

1.5 METODOLOGÍA Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

La metodología a emplear considera los siguientes pasos:

- a. Revisión bibliográfica.
- b. Toma de medidas in situ de la caldera de 200Bhp gracias a las facilidades brindadas por la Empresa Equipos Térmicos.
- c. Realización de Esquemas y cálculos respectivos, estudio y análisis de resultados, selección de accesorios y recomendaciones para la conversión. Planos, P&D y montaje.
- d. Realización de la conversión, pruebas de funcionamiento, medición de parámetros de combustión y rendimiento térmico antes y después de la conversión a gas natural.
- e. Conclusiones y recomendaciones.

El grado de profundidad y alcance que tiene la investigación se desarrolló en el marco de una investigación del nivel descriptivo y explicativo.

Descriptivo porque se busco especificar las características importantes de los aspectos relacionados con la reconversión óptima de calderas que usan petróleo industrial N° 6 a gas natural.

Explicativo porque en base a los resultados obtenidos se declara si el análisis realizado permite optimizar la reconversión de calderas de la empresa Vopak Serlipa en la Provincia Constitucional del Callao.

1.6 IMPORTANCIA

1.6.1 TECNOLÓGICA

Debido al poco desarrollo académico y tecnológico de nuestro país en el campo de la combustión industrial y quemadores, es necesario investigar y conocer los parámetros de diseño, funcionamiento, operación y características constructivas de los quemadores de gas natural y combustibles líquidos a fin de realizar una conversión adecuada garantizando operación segura y rendimiento térmico óptimo.

1.6.2 ECONÓMICA

La reconversión de calderas a gas natural clásicamente se realiza, mediante la sustitución de quemadores a un costo relativamente alto. El presente trabajo pretende disminuir dichos costos mediante la conversión de quemadores que usen petróleo industrial al gas natural y desestimar el cambio por quemadores nuevos.

1.6.3 AMBIENTAL

Las emisiones de las calderas que se liberan por la chimenea son normalmente resultado de la combustión incompleta de los combustibles que usan, la

reconversión de las calderas que usan petróleo industrial N° 6 a gas natural reduce el impacto de la contaminación por CO₂ entre 20 a 25%, particulados por inquemados sólidos y cenizas, así como la emisión de SO_x prácticamente se reducen a cero.

1.6.4 LIMITACIONES

El trabajo se encuentra limitado a la disponibilidad de la caldera que nos brinde la empresa Equipos Térmicos, tanto para la ejecución y las regulaciones de operación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 COMBUSTIBLES

Los combustibles son sustancias que se oxidan para producir calor. El término combustible se limita por lo general a sustancias que arden fácilmente con el oxígeno del aire u oxígeno puro emitiendo grandes cantidades de calor. Los elementos básicos en la constitución de todos los combustibles son el carbono y el hidrógeno; durante la combustión el carbono pasa a anhídrido carbónico y el hidrógeno a agua. Los combustibles se utilizan en la producción de calor para procesos de calentamiento, secado y calefacción, así como fuente de energía térmica en calderas, turbinas y/o motores de combustión interna¹.

Los combustibles pueden clasificarse en naturales y artificiales, entre los primeros tenemos a combustibles fósiles antracitas, hullas, lignitos, petróleo y gas natural. La mayoría de los combustibles artificiales se producen partiendo de los combustibles naturales a través de distintos procesos de elaboración (coque, briquetas); todos los derivados del petróleo (diesel, kerosene, gasolinas, petróleos industriales, etc.) y finalmente los gases manufacturados (gas licuado de petróleo GLP, acetileno, gas pobre, etc.)².

¹ Miranda, S. 2002. Curso de Química Industrial II: Combustión. Facultad de Ingeniería. U.A. p. 1.

² Curso Tecnología del Calor, Facultad de Ingeniería Mecánica. UTNA. p. 3.

2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES

Los combustibles normalmente utilizados en la industria pueden clasificarse atendiendo a su naturaleza según se indica en la Tabla N° 2.1

Tabla N° 2.1 Combustibles Industriales.

Sólidos		Líquidos	Gaseosos		
Naturales	Artificiales	Derivados del petróleo	Gas natural	Gases licuados de petróleo	Gases artificiales
Madera y residuos vegetales	Coques	Gasóleo		Propano	Gas pobre
Turbas	Aglomerados, briquetas	Fuel – oil		Butano	Gas de agua
Lignitos	Carbón vegetal			Residuales	Gas de horno alto
Hullas					
Antracitas					

Fuente: Manuales técnicos y de Instrucción para conservación de la Energía – Combustibles y Combustión - Centro de Estudios de la Energía-España.

2.1.1.1 MADERA Y RESIDUOS VEGETALES

La madera no presenta un gran interés en la industria como combustible. Sin embargo, al calentarla en ausencia de aire se obtiene el carbón de madera, utilizando como adsorbente en la industria química y como reductor en la metalurgia. Los combustibles residuales agrícolas y la madera son muy numerosos, sin embargo, su consumo está limitado a las industrias que los generan o a zonas concretas³.

³ Combustibles y su combustión. 1983. Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía. Ed. Centro de Estudios de la energía. p. 17.

2.1.1.2 TURBAS

Son masas fibrosas de materia vegetal parcialmente descompuesta, que se ha acumulado en lugares inundados de agua y generalmente se utiliza localmente como combustible pobre⁴.

2.1.1.3 LIGNITOS

Bajo esta denominación se engloban muy diversos tipos de carbones, aunque suelen agruparse en dos categorías: lignitos pardos y lignitos negros⁵.

2.1.1.4 HULLAS

Son los carbones que presentan un mayor interés, tanto como portadores de energía como por ser materia prima en la industria química y metalurgia. Existen numerosas clasificaciones de las hullas, motivado por los amplios límites en que se mueven sus características⁶.

2.1.1.5 ANTRACITA

Es el carbón más duro y denso, tiene un contenido de calor elevado. Fuera de su combustión directa se utiliza para aplicaciones metalúrgicas y gasificación⁷.

2.1.1.6 COMBUSTIBLES SÓLIDOS ARTIFICIALES

Se obtienen fundamentalmente al someter a un combustible sólido a la acción del calor sin contacto con el aire. Exclusivamente como combustibles solamente se utilizan cuando son subproductos en la fabricación de gas⁸.

⁴ Combustibles y su combustión. 1983. Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía. Ed. Centro de Estudios de la energía. p. 17.

⁵ Ibid., p. 18.

⁶ Ibid., p. 18.

⁷ Ibid., p. 18.

⁸ Ibid., p. 18.

2.1.1.7 DIESEL 2 Y PETRÓLEOS INDUSTRIALES

Son combustibles líquidos obtenidos en la destilación del petróleo o como residuos de este proceso⁹.

2.1.1.8 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS RESIDUALES

Se obtienen en algunos procesos industriales, como en la fabricación de papel, realizándose su combustión en hogares especiales en la propia fábrica¹⁰.

2.1.1.9 GAS NATURAL

El gas natural se encuentra en yacimientos similares a los del petróleo, al que acompaña frecuentemente. Su componente principal es el metano, formando una mezcla con éste se encuentran etano, propano y butano además de otros compuestos; las proporciones de cada componente son muy variables¹¹.

2.1.1.10 GASES LICUADOS DE PETRÓLEO (G.L.P.)

Los gases licuados se obtienen en las operaciones de refino del petróleo. Se venden en botellas o camiones-cisterna en forma líquida. El propano, debido a su mayor presión, se emplea principalmente en la industria y el butano para usos domésticos¹².

2.1.2 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los principales combustibles líquidos se hacen mediante la destilación fraccionada del petróleo crudo, que es una mezcla de hidrocarburos y derivados de ellos, pueden contener azufre en grandes cantidades, nitrógeno, oxígeno, vanadio,

⁹ Combustibles y su combustión. 1983. Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía. Ed. Centro de Estudios de la energía. p.18.

¹⁰ Ibid., p. 18.

¹¹ Ibid., p. 18.

¹² Ibid., p. 18.

níquel o arsénico. Por lo cual el crudo se somete a la desulfuración, la hidrogenación, la descomposición térmica, catalítica (cracking) y otros procesos de refinación antes de mezclarse y venderse como combustibles¹³.

En nuestro país los combustibles líquidos oficialmente producidos y comercializados para el uso industrial y comercial son el petróleo industrial N° 6, el petróleo industrial 500 y el diesel N° 2. Los mismos tienen uso masivo en la generación de vapor para procesos industriales de calentamiento, secado, generación eléctrica, calefacción residencial, comercial e industrial.

2.1.3 PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS INDUSTRIALES

Se estudiarán las principales propiedades del petróleo industrial N° 6 conocido también internacionalmente como el “bunker C”, por ser tema de estudio de esta tesis.

2.1.3.1 DENSIDAD

La densidad se define por el cociente entre la masa de un cierto volumen de combustible líquido y dicho volumen, a una determinada temperatura. Por lo general se considera que la temperatura es de 15°C y la presión atmosférica (760 mm Hg).

2.1.3.1.1 LOS GRADOS API

Son una escala de medición de la densidad de los hidrocarburos líquidos creada por el *American Petroleum Institute*, basada en la gravedad específica. Esta escala de medida se calibra en términos de grados API. El valor más alto en grados API corresponde a un compuesto ligero. La gravedad específica o la densidad relativa están medidas a 60°F, ver Tabla N° 2.2.

¹³ Curso Tecnología del Calor, Facultad de Ingeniería Mecánica. UTNA. p. 3.

La relación entre los grados API, la gravedad específica es:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{gr.esp. a } 60^{\circ}\text{F}/60^{\circ}\text{F}} - 131,5 \quad (2.1)$$

Tabla N° 2.2 Grados API de Combustibles líquidos (15.6°C)

Combustible	°API	Gravedad Específica
Diesel N° 2 (Petroperú)	34,3	0,84 – 0,87
Petróleo Industrial N° 6 (Petroperú)	14	0,95 – 0,99
Petróleo Industrial N° 6 (Repsol)	12,5	0,9827
Petróleo Industrial 500 (Petroperú)	13,5	0,96 – 0,99
Petróleo Industrial 500 (Repsol)	11,9	0,9869

Podemos mencionar que los grados API varían según la temperatura de referencia, la gravedad específica promedio, del petróleo industrial N° 6 que se considera para el estudio es de 0,985.

2.1.3.2 VISCOSIDAD¹⁴

La viscosidad es la medida física de la resistencia que opone un líquido a fluir cuando se le aplica una fuerza exterior. Sin duda alguna, la viscosidad es una de las características más importantes de un combustible en lo que se refiere a su almacenamiento, trasiego y utilización. En efecto, las bombas cañerías y quemadores que forman el sistema de alimentación y combustión, se diseñan para trabajar dentro

¹⁴ Combustibles y su combustión. 1983. Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía. Ed. Centro de Estudios de la energía. p. 31.

de un rango específico de viscosidad, la cual se ajusta a las condiciones de trabajo requeridas variando su temperatura.

Los Petróleos Industriales N° 6 y 500, debido a su alta viscosidad, generalmente requieren ser calentados para adecuar su viscosidades a las condiciones de bombeo y funcionamiento de los equipos.

Tabla N° 2.3 Tabla de Temperatura de Bombeo y atomización

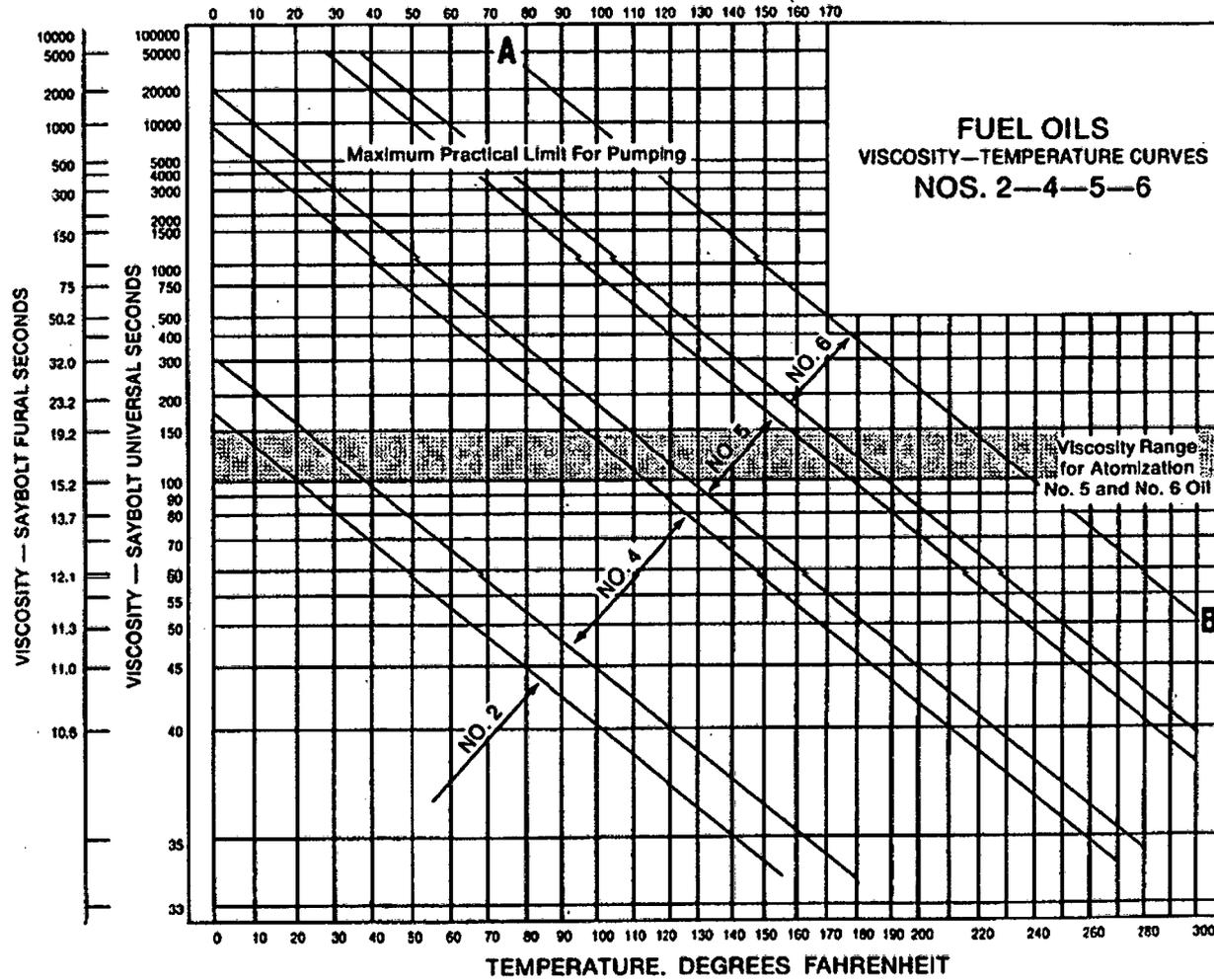
Combustible	Temperatura de bombeo (mínima) °C	Temperatura de atomización (Tiro forzado) (°C)
Petróleo Industrial N°6	45	100 – 110
Petróleo Industrial 500	50	110 – 120

Fuente: Petroperú.

En la Figura N° 2.1, se muestra como varía la viscosidad cinemática de los distintos petróleos en función de la temperatura según U.S. *Dept. of Commerce Commercial Standard CS12 – 4B*.

La viscosidad de un combustible líquido varía intensamente con su temperatura y resulta poco sensible a las oscilaciones moderadas de la presión, cuyos efectos pueden despreciarse en la mayoría de aplicaciones prácticas.

Figura N° 2.1 Viscosidad de diversos tipos de Petróleo



Fuente: Section I4 General Engineering Data Cleaver Brooks

Tabla N° 2.4 Viscosidad de los combustibles líquidos

Combustible	Temperatura (°C)	Viscosidad cSt
Diesel N° 2	50	3,1
Petróleo Industrial N° 6	50	618
Petróleo Industrial 500	50	1.013

Fuente: Petroperú

2.1.3.3 PODER CALORÍFICO

Se define como Poder Calorífico de un combustible, a la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa, a presión atmosférica, de los componentes de la unidad de masa (o volumen) de dicho combustible, se tiene tanto el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI).

2.1.3.3.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

Es la cantidad total de calor de un combustible, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en dicho combustible.

2.1.3.3.2 PODER CALORÍFICO INFERIOR O NETO (PCI)

Es la cantidad de calor que resulta al restar del poder calorífico superior el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en el combustible¹⁵ (Ver Tabla N° 2.5).

¹⁵ Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. p. 3.

Tabla N° 2.5 Poder Calorífico.

Tipo de combustible	PCS	PCI
	BTU/Gal	BTU/Gal
Kerosene	135.567	127.060
Diesel N° 2	139.619	131.036
Petróleo Industrial N° 6 (REPSOL)	151.000	142.800
Petróleo Industrial N° 6 (PETROPERU)	151.222	143.150
Petróleo Industrial N° 6 (Promedio)	151.100	142.975
Petróleo Industrial 500 (REPSOL)	151.400	143.170
Petróleo Industrial 500 (PETROPERU)	151.517	143.421

Fuente: Repsol y Petroperú

Tabla N° 2.6 Poder calorífico Promedio del Petróleo Industrial N°6

Combustible	PCS kcal/kg	PCI kcal/kg
Petróleo Industrial N° 6	10.220	9.670,5

Fuente: Elaboración propia, considerando valores promedio.

2.1.3.4 ANÁLISIS ELEMENTAL

Comprende la determinación de: Agua, Cenizas, Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Azufre, Nitrógeno, Vanadio. Los resultados se expresan en tanto por ciento en peso a unas condiciones específicas. Se utilizan para determinar las necesidades de aire teórico necesario para la combustión y sirve además para identificar las características de una posible emisión hacia el medio ambiente (Ver Tabla N° 2.7).

Tabla N° 2.7. Análisis elemental de petróleo N° 6, R500 y Diesel 2.

Combustible	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre
	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>
Petróleo Industrial 500	87,2	11,4	0,3	0,3	1,4
Petróleo Industrial N° 6	87,1	11,6	0,3	0,2	0,9
Diesel N° 2	86,1	13,4	0,1	0,02	0,14

Fuente: Petroperú.

2.1.3.5 TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN

Es la menor temperatura a la que se inflaman los vapores emitidos por el combustible al ponerlo en contacto con una llama que si es retirada no hace posible mantener la combustión, este parámetro presenta especial importancia en combustibles líquidos¹⁶ (Ver Tabla N° 2.8).

Tabla N° 2.8 Temperatura de inflamación de combustibles líquidos.

Combustibles líquidos Combustible	Temperatura Inflamación
Gasolina	-46°C
Petróleo Diesel 2	52°C
Petróleo Industrial 6	65,5°C
Petróleo Residual 500	65,5°C

Fuente: Fichas de datos de seguridad, en base a la Refinería la Pampilla.
http://www.repsol.com/pe_es/corporacion/complejos/refineria-la-pampilla/conoce_refineria_pampilla/productos_y_servicios/productos/default.aspx

¹⁶ Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. p. 6.

2.1.3.6 TEMPERATURA DE IGNICIÓN

Es la temperatura mínima a la que debe ser calentado un material en el aire, para que en ella se pueda iniciar y mantener una combustión independiente de la fuente de calor mientras exista combustible¹⁷ (Ver Tabla N° 2.9).

Tabla N° 2.9 Temperatura de Ignición para diversos combustibles

Combustible	Temperatura de Ignición
Kerosene	228 °C
Gasolinas	260 - 426 °C (*)
Diesel	257 °C
Petróleo Industrial 6	408 °C
Petróleo Industrial 500	408 °C

Fuente: Refinería la pampilla. http://www.repsol.com/pe_es/corporacion/complejos/refineria-la-pampilla/conoce_refineria_pampilla/productos_y_servicios/productos/default.aspx
 (*) Steam its Generation and Use, 2005, Edición 41, Babcock & Wilcox, Barberton, Ohio.

2.1.3.7 CONTENIDO DE AGUA Y SEDIMENTOS.

La presencia de agua en los combustibles proviene del transporte y almacenamiento, generalmente no supera el 0,1%. La presencia de agua hasta un máximo de 0,5% no causa problemas, mayores cantidades pueden interferir con la combustión si el combustible se calienta a una temperatura superior a 100°C. Los sedimentos son sustancias no solubles en benceno y están representados por el coque,

¹⁷ Rojas, F. 2005. Ingeniería de Combustibles Gaseosos. Facultad de Ingeniería de la PUPC. p. 12.

hidrocarburos inestables, sales. Los sedimentos pueden obstruir los filtros y boquillas. Generalmente la cantidad de agua y sedimentos no excede el 0,1%¹⁸.

2.1.4 COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los combustibles gaseosos se obtienen de forma natural y también artificial; en su estado natural es llamado como Gas Natural y cuando se obtiene como resultado de ciertos procesos industriales se denomina Gas Licuado de Petróleo (GLP). La composición de estos combustibles varía según la procedencia de los mismos, siendo los componentes principales el carbono, hidrógeno y oxígeno.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos, cuya composición incluye diversos hidrocarburos gaseosos, con predominio del metano, aproximadamente 90%, y en proporciones menores etano, propano, butano, pentano y pequeñas proporciones de gases inertes como dióxido de carbono y nitrógeno. El gas natural lo podemos encontrar en yacimientos en el subsuelo, ya sea en forma libre o asociada con hidrocarburos líquidos.

En la Tabla N° 2.10 se presenta la composición del gas de natural de Camisea.

¹⁸ Annaratone, D. et al. 2008. Steam Generators Descriptions and Design. Ed.1. p. 120.

Tabla N° 2.10 Composición del Gas Natural

Componente	Nomenclatura	Composición (%)
Metano	CH_4	88,2898
Etano	C_2H_6	10,5170
Propano	C_3H_8	0,1551
n-Butano	C_4H_{10}	0,0084
i-Butano	C_4H_{10}	0,0058
n-Pentano	C_5H_{12}	0,0008
i-Pentano	C_5H_{12}	0,0011
Hexano	C_6H_{14}	0,0007
Heptano	C_7H_{16}	0,0005
Octano	C_8H_{18}	0,0003
Nitrógeno	N_2	0,7835
Gas Carbónico	CO_2	0,2370

Fuente: COGA- Estación de medición U2201- Junio 2008

2.1.5 PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

2.1.5.1 CONDICIONES NORMALES

Se dice que un gas está en condiciones “normales” cuando la presión que actúa sobre él es sólo la atmosférica (presión absoluta de 1,01325 bar) y además la temperatura es de 0°C¹⁹.

¹⁹ Miranda, A. y Pujol, O. 1994. Biblioteca del instalador de gas: conocimientos fundamentales. Ed. 1. p. 117.

2.1.5.2 CONDICIONES ESTÁNDAR

Se dice que un gas está en condiciones “estándar” cuando la presión que actúa sobre él es solo la atmosférica (presión absoluta de 1,01325 bar) y además la temperatura es de 15 °C²⁰.

2.1.5.3 METRO CÚBICO NORMAL

Es la cantidad de gas seco contenido en un volumen de metro cúbico a la temperatura de 273,15 °K (0 °C) y a una presión absoluta de 1,01325 bar (760 mm c.d. Hg)²¹.

2.1.5.4 METRO CÚBICO ESTÁNDAR

Es la cantidad de gas seco contenido en un volumen de metro cúbico a la temperatura de 288,15 °K (15 °C) y a una presión absoluta de 1,01325 bar (760 mm c.d. Hg)²².

2.1.5.5 DENSIDAD ABSOLUTA

La densidad absoluta o masa volumétrica de un cuerpo, se define como la masa contenida en la unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.2)$$

La unidad más habitual es el kg/Nm³.

El volumen que ocupa un gas se suele referir a sus condiciones normales (0°C y 1013,25 mbar), 1 Nm³ es por tanto 1 m³ de gas medido en condiciones normales.

²⁰ Norma Española 1997, Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676, España. p. 8.

²¹ De Andres, J., Pomatta, R. Aroca, S. y Garcia, M 1997, Instalaciones de Combustibles gaseosos, Ediciones: A.Madrid Vicente, Madrid España. p. 46.

²² Ibid., p. 46.

2.1.5.6 DENSIDAD RELATIVA (P_s)

La densidad relativa es la relación entre la densidad absoluta del gas y del aire en las mismas condiciones de presión y temperatura. El valor de esta propiedad indica si un gas es más o menos pesado que el aire ($\rho_{an} = 1,293 \text{ kg/Nm}^3$).

$$\rho_s = \frac{\rho}{\rho_a} \quad (2.3)$$

Donde:

ρ : es la densidad del gas;

ρ_a : densidad del aire a la misma presión y temperatura que el gas.

Los gases menos pesados que el aire ($\rho_s < 1$) tienden a ascender diluyéndose fácilmente en la atmósfera. En cambio, aquellos gases más pesados que el aire ($\rho_s > 1$) se sitúan en las partes bajas del recinto o a ras del suelo, si bien con el tiempo van mezclándose y disipándose en la atmósfera. En la Tabla N° 2.11 se presenta la densidad y la gravedad específica de los combustibles gaseosos.

2.1.5.7 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un gas es el calor liberado por la unidad de volumen de gas. Se suele expresar en kcal/Nm^3 (ó en MJ/Nm^3) de gas en condiciones normales o en condiciones estándar.

En la Tabla N° 2.11 se presenta los poderes caloríficos superiores del GLP y del gas natural en kcal/Sm^3 y su equivalencia en kcal/kg .

Tabla N° 2.11 Propiedades de los gases combustibles

Gas	Densidad kg/Sm ³	Gravedad especifica	PCS kcal/Sm ³	PCS kcal/kg
GLP	2,106	1,7135	25.000 (104,67 MJ/Sm ³)	11.864 (49,672 MJ/kg)
Gas Natural (Camisea)	0,7513	0,613	9.652 (40,410 MJ/Sm ³)	12.847 (53,787 MJ/kg)

Nota: kcal /Sm³: es en estado gaseoso a condiciones estándar

2.1.5.8 TEMPERATURA DE IGNICIÓN

Es la temperatura mínima a la que debe ser calentado el gas en el aire, para que en ella se pueda iniciar y mantener una combustión independiente de la fuente de calor mientras exista combustible.

En el caso de los combustibles gaseosos, a la temperatura de ignición muchos autores lo llaman también como la temperatura de inflamación

La temperatura de ignición de los gases se presenta en la Tabla N° 2.12.

Tabla N° 2.12 Temperatura de ignición de los gases

Gas	Temperatura de Ignición (°C)
Propano	480 °C (*)
Metano	632,22 - 748,88 (**)

Fuente :

(*) Becco, L. 1985, Los G.L.P, Editorial Butano S.A. Madrid, España.

(**) Steam its Generation and Use, 2005, Edición 41, Babcock & Wilcox, Barberton, Ohio.

2.1.5.9 LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

Se denominan "límites de inflamabilidad" a las composiciones en tanto por ciento de gas en la mezcla gas-aire, a presión y temperatura ambiente, para las cuales

la mezcla es inflamable. Con porcentajes por debajo del "Límite inferior de inflamabilidad" o superiores al "Límite superior de inflamabilidad" no es posible mantener la combustión, definiéndose en consecuencia el llamado "dominio de inflamabilidad" a aquellas composiciones comprendidas entre ambos límites²³.

En la Tabla N° 2.13 se presenta los límites de inflamabilidad de los gases combustibles a 1 atmosfera y 20°C.

Tabla N° 2.13 Limite de inflamabilidad de gases combustibles

Combustible	Aire		Oxígeno	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Metano	5,00%	14,00%	5,00%	60,00%
Propano	2,37%	9,50%	2,30%	45,00%
Butano	1,86%	8,41%	1,80%	40,00%
Hidrógeno	4,00%	74,20%	4,00%	94,00%
Acetileno	2,50%	80,50%	2,80%	93,00%
Monóxido de carbono	12,50%	74,20%	16,00%	94,00%
Gas Natural	5,00%	15,40%	----	----
Gas licuado de petróleo	1,80%	9,50%	----	----
Gases de Alcohol	1,90%	3,30%	----	----
Gases Gasolina	1,40%	7,40%	----	----

Fuente: Indura Perú S.A.

²³ Asociación Española de Gas - SEDIGAS, 2010.

<http://www.sedigas.es/php/download.php?f=paginas/89/archivos/187/doc/es/rev0_tema1_generalidades_sobre_el_gas.pdf>. p. 9.

2.1.5.10 INTERCAMBIABILIDAD DE LOS GASES COMBUSTIBLES²⁴

Dos gases serán intercambiables para un quemador determinado cuando con las mismas condiciones de suministro, presión y temperatura, mantienen las mismas características de combustión. Para determinar la intercambiabilidad de los gases, se establecerán unas relaciones entre el gasto calorífico y el potencial de combustión.

Las relaciones anteriores se conocen por Índice de Wobbe (W).

El índice de Wobbe se define como el cociente del poder calorífico de un gas y la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas con respecto al aire en las mismas condiciones de referencia. Según se utilice el PCS o el PCI se hablara de índice de Wobbe superior (W_s) o índice de Wobbe inferior (W_i), el más utilizado es el primero.

$$W_s = \frac{PCS}{\sqrt{\rho_s}} \quad (2.4)$$

Donde:

PC: Poder calorífico del gas

ρ_s : Densidad relativa del gas

Al intercambiar dos gases entre sí alimentándolos a la misma presión, la condición para que no varíe el gasto calorífico del quemador es que el valor del índice Wobbe sea el mismo en ambos gases. Se dice por tanto que dos gases son intercambiables cuando tienen el mismo índice de Wobbe.

En función del valor de W_s se clasifican los gases en tres familias según la norma UNE EN 437 ó UNE 60.002 (Ver Tabla N° 2.14).

²⁴ Asociación Española de Gas - SEDIGAS, 2010.

<http://www.sedigas.es/php/download.php?f=paginas/89/archivos/187/doc/es/rev0_tema1_generalidad_sobre_el_gas.pdf>. p. 10.

Tabla N° 2.14. Clasificación de gases en familias.

Familias de gases y grupos	Índice de Wobbe superior a 15°C y 1.013,25 mbar (MJ/m ³)	
	Mínimo	Máximo
Primera familia	19,13	27,64
Segunda familia	39,1	54,7
Tercera familia	72,9	87,3

La primera familia incluye los gases manufacturados, gas de coquería y mezclas hidrocarburos-aire (aire propanado y aire metanado) de bajo poder calorífico (entre 16,74 y 19,8 MJ/Nm³).

La segunda familia incluye los gases naturales, gas natural sintético y las mezclas hidrocarburo-aire (aire propanado) de alto poder calorífico (entre 33,48 MJ/Nm³ y 50,4 MJ/Nm³).

La tercera familia incluye los gases licuados de petróleo (GLP), que son el propano y butano, con PCS entre 100,44MJ/Nm³ y 129,6MJ/Nm³. Las presiones de uso o utilización según las familias del gas se presentan en la Tabla N° 2.15.

Tabla N° 2.15 Presiones de utilización según familia de gases

Familias de gases	Presiones de utilización (mbar)	
	Mínimo	Máximo
Primera familia	8	12
Segunda familia	18	22
Tercera familia	28	37

2.1.6 ANÁLISIS DEL COMBUSTIBLE- CROMATOGRAFÍA

En la Tabla N° 2.16 se presenta el análisis cromatográfico del Gas Natural de Camisea, según promedio mensual.

Tabla N° 2.16 Análisis Cromatográfico del Gas Natural de Camisea

Propiedad		Unidad	Valor
Poder Calorífico		MJ/m ³	40,47
Composición %Molar	N ₂		0,783
	CO ₂		0,237
	C ₁		88,290
	C ₂		10,517
	C ₃		0,155
	n-C ₄		0,008
	i-C ₄		0,006
	n-C ₅		0,001
	i-C ₅		0,001
	C ₆		0,001
	C ₇		0,001
C ₈		0,000	
Índice de Wobbe		MJ/m ³	51,720
Densidad relativa			0,612

Fuente: COGA- Estación de medición U2201- Junio 2008

2.2 COMBUSTIÓN

Industrialmente, se entiende por combustión la combinación violenta con desprendimiento sensible de calor y luz, del oxígeno del aire con el carbono, hidrógeno y azufre, que constituyen los elementos activos de los combustibles líquidos, gaseosos y sólidos.

Las reacciones de combustión son fuertemente exotérmicas. En el caso de los combustibles comunes, consiste en la oxidación por el oxígeno de la atmósfera de los elementos componentes del combustible generando dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre y agua.

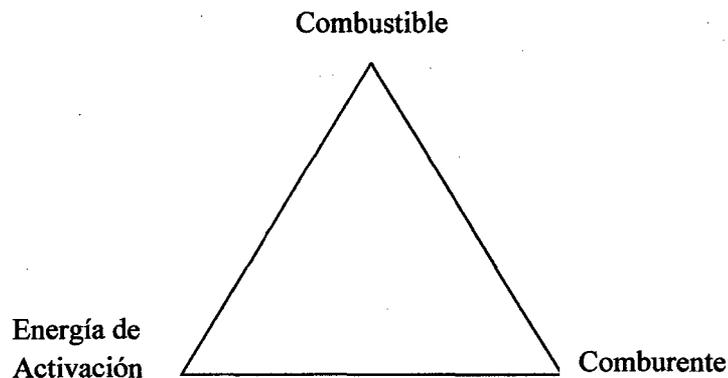
En la mayoría de los casos las reacciones de combustión se realizan en fase gaseosa. Incluso en la combustión de algunos combustibles sólidos nos encontramos con una combustión en fase gaseosa ya que por efecto de pirólisis y destilación se escapan vapores de estos materiales, los cuales se queman después de mezclarse con el oxígeno del aire. En el extremo opuesto puede encontrarse la detonación de los explosivos sólidos o líquidos.

Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores:

- a. Combustible.
- b. Comburente.
- c. Energía de activación.

Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo (Ver Figura N° 2.2).

Figura N° 2.2 Triángulo de la Combustión.



2.2.1 DEFINICIONES BÁSICAS

2.2.1.1 MOL²⁵

La masa de cualquier sustancia puede expresarse por medio del número de moles definido como:

$$n_i[\text{kmol}] = \frac{m_i[\text{kg}]}{M_i[\text{kg/kmol}]} \quad (2.5)$$

siendo: n_i : Número de moles de la sustancia [mol, kmol, etc.]

m_i : Masa de la sustancia [g., kg., etc.]

M_i : Masa molecular de la sustancia [g/mol, kg/kmol, etc.]

2.2.1.2 FRACCIÓN MOLAR²⁶

Es la relación existente entre el número de moles de la sustancia particular y el número de moles totales de todas las sustancias que forman la mezcla homogénea que contiene a la sustancia particular. Se aplica a mezclas gaseosas, por ejemplo: el aire, el gas natural, vapores multicomponentes, etc.

La fracción molar es equivalente a la fracción volumétrica para los gases.

$$\bar{x} = \frac{n_i[\text{kmol}]}{n_t[\text{kmol}]} \quad (2.6)$$

Donde:

n_i : Número de moles de la sustancia

n_t : Número de moles totales de la mezcla

²⁵ Curso Tecnología del Calor, Facultad de Ingeniería Mecánica. UTNA. p. 1.

²⁶ Ibid., p. 1.

Se deduce fácilmente la relación entre la fracción molar y la presión parcial por medio de la ecuación de estado (para toda la mezcla).

$$p \cdot V = n_t \cdot R \cdot T \quad (2.7)$$

Recordando que se define a presión parcial p_i como la presión que ejercería el componente si el solo ocupara todo el volumen "Dalton" (para el componente i).

$$p_i \cdot V = n_i \cdot R \cdot T \quad (2.8)$$

Dividiendo (2.8) por (2.7)

$$\frac{p_i \cdot V}{p \cdot V} = \frac{n_i \cdot R \cdot T}{n_t \cdot R \cdot T} \Rightarrow \frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n_t} = y_i \quad (2.9)$$

$$\bar{x} \cdot p = p_i \quad (2.10)$$

Fracción molar \times presión total = presión parcial

2.2.1.3 MASA MOLECULAR DE UNA MEZCLA GASEOSA²⁷

La masa molecular de una mezcla gaseosa puede calcularse conociendo la fracción volumétrica o molar de sus componentes, así para el caso del aire seco se puede suponer (a los efectos de cualquier cálculo de ingeniería), que está formado por Nitrógeno (N_2) y Oxígeno (O_2) con la siguiente composición:

$$\% N_2 = 79 \Rightarrow 0,79 V_{N_2}/V_{aire} \times 100$$

$$\% O_2 = 21 \Rightarrow 0,21 V_{O_2}/V_{aire} \times 100 \quad (2.11)$$

Que expresada como fracción molar es:

²⁷ Curso Tecnología del Calor, Facultad de Ingeniería Mecánica. UTNA. p. 2.

$$\bar{x}_{N_2} = 0,79 \text{ moles de } N_2 / \text{ moles de aire}$$

$$\bar{x}_{O_2} = 0,21 \text{ moles de } O_2 / \text{ moles de aire} \quad (2.12)$$

La masa molecular del aire seco se podrá calcular como:

$$M_a = \bar{x}_{N_2} \cdot M_{N_2} + \bar{x}_{O_2} \cdot M_{O_2} \quad (2.13)$$

Siendo:

$$M_{N_2} = 2 \times \text{masa atómica del } N_2 = 2 \times 14,006 = \frac{28 \text{ kg}}{\text{kmol de } N_2}$$

$$M_{O_2} = 2 \times \text{masa atómica del } O_2 = \frac{32 \text{ kg}}{\text{kmol de } O_2}$$

$$M_{\text{aire}} = 0,79 \times 28 + 0,21 \times 32 \quad (2.14)$$

$$M_{\text{aire}} = 28,85 \frac{\text{kg}}{\text{kmol de aire}}$$

Para cualquier otro gas se deberá conocer su composición volumétrica para calcular su peso molecular.

2.2.2 AIRE²⁸

Se conoce como comburente a una especie química capaz de oxidar un combustible, en la práctica industrial el comburente es el oxígeno presente en el aire, sin embargo, una pequeña parte del oxígeno necesario para la combustión puede ser obtenido del que forma parte del propio combustible. El aire sobre oxigenado y el oxígeno puro pueden ser utilizados como comburentes, pero este tipo de sustancias se usan sólo en raras ocasiones. Si despreciamos la presencia de cantidades ínfimas

²⁸ Combustión. 2010. Universitat de Jaume I. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. p. 1.

de Neón, Kriptón, Xenón y Helio, la composición del aire seco es la mostrada en la Tabla N° 2.17 y Tabla N° 2.18.

Tabla N° 2.17 Composición del aire atmosférico

Componente	% en volumen	% en peso
O_2	20,95	23,15
N_2	78,09	75,52
Argón	0,93	1,28
CO_2	0,03	0,05

Tabla N° 2.18 Valores prácticos adoptados para la composición del aire

Componente	% en volumen	% en peso
O_2	21	23,2
N_2	79	76,8
N_2/O_2	3,76	3,31
Aire/ O_2	4,76	4,31

La densidad del aire a condiciones normales (a 0°C y a una atmósfera de presión) es de $\rho_{an} = 1,293 \text{ Kg/Nm}^3$.

2.2.3 AIRE HÚMEDO²⁹

Es el aire atmosférico que incorpora al oxígeno (O_2) y al nitrógeno (N_2) cantidades variables de humedad (H_2O) que es preciso tener en cuenta en muchas aplicaciones.

²⁹ Márquez, M. 2005. *Combustión y Quemadores*, Editorial Marcombo, España. p. 19.

El contenido de humedad de un aire se suele expresar referido a base seca, y así se define la humedad absoluta por los kg de H_2O por cada kg de aire seco, valor que se simboliza por ω .

Dadas una presión total p y una temperatura T , el aire no puede contener cualquier cantidad de vapor de agua, sino que, alcanzando un valor de saturación, los valores en exceso corresponderán a estados de niebla (agua líquida); en efecto, a la temperatura T , el agua tiene una presión de vapor saturada, $p_s(T)$.

La ecuación (2.15) indica el cálculo de la humedad absoluta, siendo ϕ la llamada humedad relativa del aire.

$$\omega = \frac{\phi * p_s}{p - \phi * p_s} * 0,622 \quad (2.15)$$

E, inversamente:

$$\phi = \frac{p}{p_s} * \frac{\omega}{0,622 + \omega} \quad (2.16)$$

Que permiten encontrar la humedad absoluta en función de la relativa, y viceversa, si se conoce la presión total (p) y la temperatura (mediante la cual, se determina p_s). En la Tabla N° 2.19 se dan los valores de p_s para el valor de agua a distintas temperaturas, junto con los valores de ρ_s en kg/m^3 .

Se denomina volumen húmedo (V_H) de un aire que contiene humedad al volumen en m^3 ocupado por un kg de aire seco, junto con el vapor de agua que lo acompaña. Puede calcularse por:

$$V_H = 461,5 * (0,622 + \omega) * (T/p) \quad (2.17)$$

Siendo T la temperatura en K y p la presión en Pa.

Tabla N° 2.19 Presión del vapor de agua en función de la temperatura, en estado de saturación.

T °C	p_s bar	ρ_s kg/m³
0	0,00611	0,00485
5	0,00872	0,00679
10	0,01227	0,0094
15	0,01704	0,01282
20	0,02337	0,01729
25	0,03166	0,02304
30	0,04241	0,03037
35	0,05622	0,03961
40	0,07375	0,05116
45	0,09582	0,06546
50	0,12335	0,08307
55	0,15741	0,1044
60	0,1992	0,1302
65	0,2501	0,1612
70	0,3116	0,1982
75	0,3855	0,2419
80	0,4736	0,2933
85	0,576	0,3535
90	0,7011	0,4235
95	0,8453	0,5045
100	1,0133	0,5977

Fuente: "Combustión y Quemadores", de Manuel Márquez Martínez.

2.2.4 COMBUSTIÓN COMPLETA³⁰

Conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de hidrocarburos:

Carbono → CO_2

Hidrógeno → H_2O

Azufre → SO_2

Nitrógeno → N_2

Oxígeno → Participará como oxidante

El Nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas de los humos pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones.

2.2.5 COMBUSTIÓN INCOMPLETA³¹

Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H_2 ; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc.

2.2.6 ÍNDICE O COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE (λ)³²

La mayor parte de las combustiones no transcurren en estas condiciones ideales (completa y estequiométrica), el principal aspecto a considerar será la posibilidad de que la combustión transcurra con exceso o defecto de aire, para caracterizar la proporción de oxígeno se define el parámetro “coeficiente de exceso de aire”:

$$\lambda = \frac{V_{ar}}{V_{at}} \quad (2.18)$$

Donde:

³⁰ García, R 2001, Combustión y Combustibles. Sistema Nacional de Información de la Energía. p. 4.

³¹ Ibid., p. 4.

³² Ibid., p. 4.

V_{ar} : Volumen de aire real

V_{at} : Volumen del aire teórico o aire mínimo

$\lambda = 1$: Combustión Estequiométrica

$\lambda < 1$: Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica

$\lambda > 1$: Exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre

Así la combustión puede ser clasificada según se indica en la Tabla N° 2.20

Tabla N° 2.20 Clasificación de la Combustión

Clasificación	λ
Combustión estequiométrica	1
Combustión con defecto de aire	< 1
Combustión con exceso de aire	> 1

2.2.6.1 COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA ($\lambda = 1$)³³

Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

2.2.6.2 COMBUSTIÓN CON DEFECTO DE AIRE ($\lambda < 1$)³⁴

La cantidad de aire utilizada no contiene el oxígeno necesario para oxidar completamente a los componentes del combustible.

³³ García R 2001, Combustión y Combustibles. Sistema Nacional de Información de la Energía. p. 5.

³⁴ Ibid., p. 5.

Además de los productos normales de la combustión, Dióxido de Carbono (CO_2) y Agua (H_2O), se producen inquemados como el Monóxido de Carbono (CO) e Hidrógeno (H_2); en algunos casos con mucho defecto de aire puede haber incluso carbono y combustible sin quemar en los humos. El calor producido es inferior al de la combustión completa ($Q_1 < Q$).

2.2.6.3 COMBUSTIÓN CON EXCESO DE AIRE ($\lambda > 1$)³⁵

En este caso la cantidad de aire aportada es superior a la correspondiente a la combustión estequiométrica; la combustión en estas condiciones puede ser completa o incompleta.

2.2.6.3.1 COMBUSTIÓN COMPLETA

Al emplearse más aire que el estrictamente necesario, en los humos se da la presencia de oxígeno. El calor generado (Q) es el correspondiente a la combustión completa.

2.2.6.3.2 COMBUSTIÓN INCOMPLETA

La cantidad de aire utilizada es superior a la correspondiente a la combustión estequiométrica, pero a pesar de ello, debido fundamentalmente a que no se ha logrado una buena mezcla entre el combustible y el aire, los componentes del combustible no se oxidan totalmente. Respecto a la combustión incompleta con defecto de aire, en los productos de la combustión también se tiene oxígeno; en casos extremos en los humos puede haber carbono y combustible sin quemar. El calor producido es inferior al de la combustión completa ($Q_2 < Q$).

La combustión estequiométrica prácticamente es irrealizable, lo que obliga a operar con excesos de aire con el fin de lograr combustiones completas.

³⁵ García R 2001, Combustión y Combustibles. Sistema Nacional de Información de la Energía. p. 6.

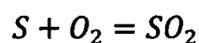
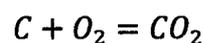
El calor producido en la combustión completa es independiente del exceso de aire, pero el aprovechamiento de este calor es tanto menor cuanto mayor es el exceso de aire con el que se trabaja, ya que una parte del calor de la combustión se utiliza en calentar a los humos y al exceso de aire, en la práctica se buscan combustiones completas con los menores excesos de aire posibles; esto se consigue con una adecuada puesta a punto de los elementos que intervienen en la combustión (líneas de combustible, quemadores, calderas y chimeneas) y un correcto mantenimiento.

Para obtener una correcta combustión debe lograrse una buena mezcla del combustible con el aire; en este sentido los combustibles gaseosos presentan mayor facilidad de mezcla que los líquidos y éstos a su vez más que los sólidos; por este motivo pueden obtenerse menores excesos de aire con los combustibles gaseosos.

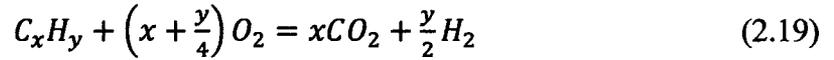
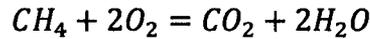
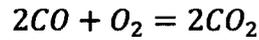
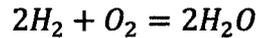
2.2.7 QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN³⁶

Los balances de materia a considerar en una combustión tienen como misión determinar la cantidad de oxígeno o aire necesario para efectuar dicha combustión. También tiene interés conocer la cantidad y composición de los productos de la combustión, ya que de la composición de los humos se puede deducir la marcha de la combustión y, con su análisis, se puede controlar la combustión, y si es perfecta o no.

La combustión consiste de una serie de reacciones que involucran diferentes componentes de los combustibles. Los más importantes son los siguientes: C , S , H_2 , CO , CH_4 , C_xH_y , O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O . Los seis primeros reaccionan con el oxígeno de la siguiente manera:



³⁶ Annaratone, D. et al. 2008. Steam Generators Descriptions and Design. Ed.1. p. 143.



El potencial de oxígeno presente en el combustible se combina con los otros componentes en sustitución de una cantidad equivalente de aire. El Nitrógeno, Dióxido de Carbono y el agua que no se queman, pero si están presentes en el producto resultante de la combustión.

Las masas moleculares de los componentes en kg/kmol que reaccionan con el oxígeno son conocidos y son como sigue:

$$C = 12,01$$

$$S = 32,06$$

$$H_2 = 2,016$$

$$CO = 28,01$$

$$CH_4 = 16,042$$

$$C_xH_y = 12,01x + 1,008y \quad (2.20)$$

Recordando que el peso molecular del oxígeno es igual a 32, a partir de la combustión de 1 kg de los diversos componentes se requiere las siguientes cantidades de oxígeno:

$$1kgC \rightarrow \frac{32}{12,01} = 2,6644kg O_2$$

$$1kgS \rightarrow \frac{32}{32,06} = 0,9981kg O_2$$

$$1kgH_2 \rightarrow \frac{32}{2 \times 2,016} = 7,936kg O_2$$

$$1 \text{ kg CO} \rightarrow \frac{32}{2 \times 28,01} = 0,5712 \text{ kg O}_2$$

$$1 \text{ kg CH}_4 \rightarrow \frac{2 \times 32}{16,042} = 3,989 \text{ kg O}_2$$

$$1 \text{ kg C}_x\text{H}_y \rightarrow \frac{(x+\frac{y}{4})^{32}}{12,01x+1,008} = 8 \frac{4x+y}{12,01x+1,008y} \text{ kg O}_2 \quad (2.21)$$

Cada kilogramo de aire contiene 0,232 kg de oxígeno. Por lo tanto, 4,31 kg de aire se requiere para tener 1 kg de O_2 . La combustión de 1 kg de los componentes examinados requiere las siguientes cantidades de aire:

$$1 \text{ kg C} \rightarrow 2,6644 \times 4,31 = 11,484 \text{ kg de aire}$$

$$1 \text{ kg S} \rightarrow 0,9981 \times 4,31 = 4,302 \text{ kg de aire}$$

$$1 \text{ kg H}_2 \rightarrow 7,936 \times 4,31 = 34,204 \text{ kg de aire}$$

$$1 \text{ kg CO} \rightarrow 0,5712 \times 4,31 = 2,462 \text{ kg de aire}$$

$$1 \text{ kg CH}_4 \rightarrow 3,989 \times 4,31 = 17,193 \text{ kg de aire}$$

$$1 \text{ kg C}_x\text{H}_y \rightarrow 8 \frac{4x+y}{12,01x+1,008} 4,31 = 34,48 \frac{4x+y}{12,01x+1,008y} \text{ kg de aire} \quad (2.22)$$

En el caso de los combustibles gaseosos y en referencia a los volúmenes, en base a la ecuación (2.19) es posible calcular con rapidez la exigencia de oxígeno en Nm^3 por cada Nm^3 de los diferentes componentes del combustible:

$$1 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 \rightarrow \frac{1}{2} = 0,5 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$1 \text{ Nm}^3 \text{ CO} \rightarrow \frac{1}{2} = 0,5 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$1 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \rightarrow \frac{2}{1} = 2 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$1 \text{ Nm}^3 \text{ C}_m\text{H}_n \rightarrow \left(m + \frac{n}{4}\right) \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 \quad (2.23)$$

Cada Nm^3 de aire contiene $0,21 \text{ Nm}^3$ de oxígeno. Por lo tanto, 1 Nm^3 de oxígeno requiere $4,76 \text{ Nm}^3$ de aire.

Basado en la ecuación (2.19), el requerimiento teórico de aire para la combustión de 1Nm^3 de los diferentes tipos de gases considerados son los siguientes:

$$1\text{Nm}^3 H_2 \rightarrow 0,5 \times 4,76 = 2,38\text{Nm}^3 \text{ de aire}$$

$$1\text{Nm}^3 CO \rightarrow 0,5 \times 4,76 = 2,38\text{Nm}^3 \text{ de aire}$$

$$1\text{Nm}^3 CH_4 \rightarrow 2 \times 4,76 = 9,52\text{Nm}^3 \text{ de aire}$$

$$1\text{Nm}^3 C_xH_y \rightarrow 4,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) \text{Nm}^3 \text{ de aire} \quad (2.24)$$

Además, considerando la cantidad de oxígeno en el aire, si el combustible contiene oxígeno, esto conduce a una reducción de requerimiento de aire equivalente a 4,31 kg por cada kg de O_2 o $4,76 \text{ Nm}^3$ por cada Nm^3 de O_2 .

2.2.8 AIRE DE COMBUSTIÓN³⁷

Sobre la base de la sección anterior, las ecuaciones en relación con el requerimiento de aire teórico se pueden calcular fácilmente. m_{atf} y V_{atf} indican el aire teórico en términos de masa y volumen por unidad de combustible, respectivamente. Los combustibles sólidos contienen carbono, hidrógeno, oxígeno, cenizas de azufre y agua (algunas veces nitrógeno). C , H , O y S son los porcentajes en peso de los componentes que participan en la combustión. Recordando la ecuación (2.22), obtenemos la siguiente ecuación respecto al aire teórico en masa, en kg de aire por kg de combustible.

$$m_{atf} = 0,11484C + 0,34204H + 0,04302S - 0,0431O \text{ kg/kg} \quad (2.25)$$

Se debe tener en cuenta que por cada kg de oxígeno contenido en el combustible, 4,31 kg menos de aire será necesario. Buscando una ecuación que

³⁷ Annaratone, D. et al. 2008. Steam Generators Descriptions and Design. Ed.1. p. 147.

considere el aire teórico en volumen, se debe tener en cuenta que la densidad del aire en condiciones normales es igual a 1,293 kg/Nm³. De la ecuación (2.25), obtenemos la siguiente ecuación, en Nm³ de aire por kilogramos de combustible.

$$V_{atf} = 0,08882C + 0,26453H + 0,03327S - 0,03333O \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2.26)$$

Las mismas ecuaciones usadas para combustibles sólidos son validas para los combustibles líquidos. Naturalmente, en el caso de los combustibles gaseosos, es preferible referirse a Nm³ de combustible. Al indicar los porcentajes en el volumen de los diferentes componentes de los gases como el CO₂, H₂, CH₄, C_xH_y, y O₂ sobre la base de ecuación (2.24), obtenemos el volumen del aire teórico en Nm³ por Nm³ de combustible.

$$V_{atf} = 0,0238(CO + H_2) + 0,00952CH_4 + 0,0476 \sum_i \left(x_i + \frac{y_i}{4}\right) C_{xi}H_{yi} - 0,0476O_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3. \quad (2.27)$$

Para utilizar una ecuación y calcular la masa de aire teórico, se debe tener en cuenta la densidad de este último en condiciones normales. En otras palabras:

$$m_{atf} = 0,03077(CO + H_2) + 0,1231CH_4 + 0,06155 \sum_i \left(x_i + \frac{y_i}{4}\right) C_{xi}H_{yi} - 0,06155O_2 \text{ kg}/\text{Nm}^3. \quad (2.28)$$

La cantidad de aire estequiométrico requerido para la combustión dada por las ecuaciones (2.25) al (2.28) son básicamente insuficientes para garantizar una combustión completa, es decir, ausencia de monóxido de carbono sin quemar.

Por otra parte, un aumento en el aire introducido en el horno para la combustión provoca una reducción en la eficiencia debido al aumento de la pérdida

de calor por el calor sensible de los gases de combustión a la salida del generador. El objetivo de afinar el caudal de aire durante el tiempo de combustión es llegar sin materia no quemada con el exceso de aire mínimo, con respecto a la teórica.

Con este contexto, el índice del aire es la relación entre el aire necesario y aire teórico. Siendo λ el índice, el aire necesario esta dado por:

$$V_{ar} = \lambda V_{at} \quad (2.29)$$

El porcentaje de exceso aire viene dado por:

$$e = (\lambda - 1)100 \quad (2.30)$$

Como referencia, para combustibles líquidos y gaseosos ver la Tabla N° 2.21

Tabla N° 2.21 Índice de aire o coeficiente de exceso de aire

Combustible	λ
Aceite combustible	1,10 – 1,30
Combustibles gaseosos	1,05 – 1,20

Fuente: Steam Generators Descriptions and Design, Edición 1, Donatello Annaratone, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2008

Por ejemplo, el aceite combustible en las plantas pequeñas puede tener un índice de aire superior a 1,3; mientras que en las grandes instalaciones con quemadores especialmente perfeccionados es posible quemar sin monóxido de carbono, incluso con λ menor que 1,1. Hay plantas que funcionan con aceite combustible donde λ se redujo a 1,05 (Annaratone, Springer, Berlin 2008)

Si la composición del combustible es desconocido excepto por su valor calórico, en el caso de combustibles sólidos o líquidos, es posible utilizar ecuaciones aproximadas o diagramas para determinar tanto el aire teórico como el aire

requerido. Entre las ecuaciones aproximadas destacamos los disponibles gracias a Rosin (Annaratone, Springer, Berlin 2008) y sugiere la siguiente ecuación para el volumen de aire teórico:

$$V_{atf} = \frac{0,241PCI}{1000} + 0,5Nm^3/kg \quad (2.31)$$

Y la siguiente ecuación es para el caso de combustibles líquidos:

$$V_{atf} = \frac{0,203PCI}{1000} + 2Nm^3/kg \quad (2.32)$$

PCI es el poder calorífico inferior del combustible expresado en kJ/kg.

Finalmente, en el caso de los combustibles gaseosos Rosin sugiere las siguientes ecuaciones:

Para gas pobre, tal como gas de alto horno:

$$V_{atf} = \frac{0,209PCI}{1000} Nm^3/kg \quad (2.33)$$

Para gas rico, tal como gas de horno de coke, gas de refinería y gas natural:

$$V_{atf} = \frac{0,26PCI}{1000} - 0,25Nm^3/kg \quad (2.34)$$

También, en el caso de combustibles gaseosos, el valor de PCI está en base a 1kg de combustible.

2.2.9 GASES DE COMBUSTIÓN (FLUE GAS)³⁸

Es conveniente referirse a gases de combustión expresada en kg por kg de combustible para combustibles sólidos y líquidos. De hecho, al referirse a la masa de aire teórico se muestra en la ecuación (2.25), es fácil de calcular los productos de combustión a través de la siguiente ecuación:

$$m_{gf} = \lambda \cdot m_{atf} + 1kg/kg. \quad (2.35)$$

³⁸ Annaratone, D. et al. 2008. Steam Generators Descriptions and Design. Ed.1. p. 151.

De hecho, el aire requerido es representado por $\lambda \cdot m_{atf}$ más 1kg de combustible para llegar a la cantidad masa de gases de combustión. Por otro lado, si es preferible calcular la cantidad de gases de combustión V_{gf} como el volumen por kg de combustible, se puede proceder de dos maneras:

- Para un valor aproximado aceptable, es suficiente recordar que la densidad de los gases de combustión es igual a 1,30 – 1,35 kg/Nm³ tanto para combustibles sólidos como líquidos. Del valor de m_g dado en la ecuación (2.35) es posible obtener el valor de V_{gf} dividiendo por la densidad.
- Sobre la base del porcentaje de masa contenido de varios componentes y el valor de V_{atf} calculado usando la ecuación (2.26), también es posible elaborar una ecuación directa para el cálculo de V_{gf} . En este sentido, debe tenerse presente que el combustible contiene generalmente carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, nitrógeno y agua. Recordando que el volumen de 1 kmol es igual a 22,412 Nm³, la combustión de 1 kg de carbón, azufre e hidrógeno produce los siguientes volúmenes de gas respectivamente:

$$1 \text{ kg } C \rightarrow \frac{22,412}{12,01} = 1,8661 \text{ Nm}^3 \text{ de } CO_2$$

$$1 \text{ kg } S \rightarrow \frac{22,412}{32,06} = 0,699 \text{ Nm}^3 \text{ de } SO_2$$

$$1 \text{ kg } H_2 \rightarrow \frac{22,412}{2,016} = 11,117 \text{ Nm}^3 \text{ de } H_2O \quad (2.36)$$

En adición, para cada kg de nitrógeno y agua en el combustible el volumen relativo en los gases de combustible son iguales a:

$$1 \text{ kg } N_2 \rightarrow \frac{22,412}{28,016} = 0,8 \text{ Nm}^3 \text{ de } N_2$$

$$1 \text{ kg } H_2O \rightarrow \frac{22,412}{18,016} = 1,244 \text{ Nm}^3 \text{ de } H_2O \quad (2.37)$$

Recordando que $4,76 \text{ Nm}^3$ de aire contiene $3,76 \text{ Nm}^3$ de nitrógeno y 1 Nm^3 de oxígeno, el volumen de nitrógeno en los gases de combustión debido al aire de combustión por kg de combustible es igual a $3,76 \lambda V_{atf}/4,76$. El volumen de oxígeno libre es igual a $(\lambda - 1)V_{atf}/4,76$.

Así el volumen de nitrógeno y oxígeno en gases de combustión, además de potencial de nitrógeno procedente del combustible, es igual a:

$$\frac{3,76\lambda V_{atf}}{4,76} + \frac{(\lambda-1)V_{atf}}{4,76} = \lambda V_{atf} - \frac{V_{atf}}{4,76} \quad (2.38)$$

Como es usual, en función a los porcentajes de masa de los componentes del combustible con C , S , H , O y H_2O , el volumen de los gases de combustión por kg de combustible es igual a:

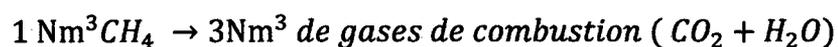
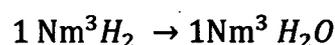
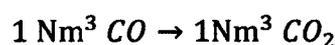
$$V_{gf} = \lambda V_{atf} - \frac{V_{atf}}{4,76} + 0,018661C + 0,11117H + 0,00699S \\ + 0,008N + 0,01244H_2O \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}. \quad (2.39)$$

Reemplazando la ecuación (2.26) en la ecuación (2.39), nosotros obtenemos lo siguiente:

$$V_{gf} = \lambda V_{atf} + 0,05558H + 0,007O + 0,008N + 0,01244H_2O \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}. \quad (2.40)$$

Dado su origen, la ecuación (2.40) será verdadera sólo si la combustión de carbón es completa, eso es, si no hay monóxido de carbono sin quemar.

En cuanto a los combustibles gaseosos, note que la combustión de 1 Nm^3 de CO , H_2 , CH_4 y C_xH_y produce los siguientes volúmenes de gas:



$$1 \text{ Nm}^3 C_x H_y \rightarrow (x + \frac{y}{4}) \text{ Nm}^3 \text{ de gases de combustion } (x CO_2 + \frac{y}{2} H_2 O) \quad (2.41)$$

Además, para cada Nm^3 de N_2 , CO_2 , and H_2O en el combustible, nosotros obviamente encontramos el mismo volumen en los gases de combustión. Por lo tanto, para un porcentaje volumétrico de los componentes del combustible CO , H_2 , CH_4 , O_2 , CO_2 , H_2O y $C_x H_y$, el volumen de los gases de combustión es igual a:

$$V_{gf} = \lambda V_{atf} - \frac{V_{at}}{4,76} + 0,01(CO + H_2 + N_2 + CO_2 + H_2O) + 0,03CH_4 \\ + 0,01 \sum_i (x_i + \frac{y_i}{4}) C_{xi} H_{yi} \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \quad (2.42)$$

Recordando la ecuación (2.27) en (2.42), se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{gf} = \lambda V_{atf} + 0,05(CO + H_2) + 0,01(CH_4 + O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O) \\ + 0,01 \sum_i \frac{y_i}{4} C_{xi} H_{yi} \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \quad (2.43)$$

Se debe observar que:

$$CO + H_2 + CH_4 + O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O + \sum C_x H_y = 100 \quad (2.44)$$

Dado que se ha supuesto que no hay presente otro gas combustible. La ecuación (2.44) puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$V_{gf} = \lambda V_{atf} + 1 - 0,005(CO + H_2) + 0,0025 \sum_i (y_i - 4) C_{xi} H_{yi} \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \quad (2.45)$$

Con el mismo supuesto que para la ecuación (2.40), en cuanto a la combustión completa del carbono, se aplica para la ecuación (2.45).

Se puede calcular m_{gf} con referencia a 1Nm^3 del combustible gaseoso fácilmente añadiendo la densidad del combustible en condiciones normales, siendo la densidad representada por ρ_f :

$$m_{gf} = \lambda \cdot m_{atf} + \rho_f \text{ kg} / \text{Nm}^3 \quad (2.46)$$

m_{af} es la masa teórica de aire dada por la ecuación (2.28). Dado que $\lambda \cdot m_{af}$ es la masa de aire requerida por Nm^3 de combustible, basta con añadir la masa de 1Nm^3 de combustible (ρ_f) y se obtiene el producto de combustión en kg/Nm^3 .

Sería posible elaborar una ecuación en función solamente de los porcentajes de los componentes, como se hizo en las ecuaciones anteriores, pero sería complejo y poco práctico como resultado. La ecuación (2.46) es definitivamente preferible a la ecuación (2.35). Se debe observar que la densidad puede ser fácilmente calculada una vez que la composición del combustible es conocida.

También se puede calcular los gases de combustión conociendo el poder calorífico inferior (PCI) utilizando ecuaciones aproximadas.

En cuanto a los combustibles sólidos, Rosin sugiere las siguientes ecuaciones:

$$V_{gf} = \frac{0,213PCI}{1000} + 1,65\text{Nm}^3/\text{kg} \quad (2.47)$$

Y la siguiente ecuación en el caso de combustibles líquidos:

$$V_{gf} = \frac{0,265PCI}{1000} \text{Nm}^3/\text{kg} \quad (2.48)$$

PCI representa el poder calorífico neto del combustible en kJ/kg y V_{gf} es la cantidad de gas teórico expresado en volumen por kg de combustible.

Para gas pobre (gas de alto horno y otros):

$$V_{gf} = \frac{0,173PCI}{1000} + 1\text{Nm}^3/\text{kg} \quad (2.49)$$

Para gas rico (gas de horno de coque, gas de refinería y gas natural):

$$V_{gf} = \frac{0,272PCI}{1000} + 0,25\text{Nm}^3/\text{kg} \quad (2.50)$$

Incluso en este caso, PCI es el valor neto a que se refiere a 1kg de combustible. Tanto las ecuaciones aproximadas y diagramas de determinar el V_{gf} se cumplen para la combustión completa del carbono.

2.2.10 CARACTERÍSTICAS DE LA LLAMA

2.2.10.1 DEFINICIÓN³⁹

Definida la combustión como una reacción química (oxidación, concretamente) entre el combustible y el comburente, la llama se puede definir como la manifestación visible y calórica de esa reacción. Para que se produzca la llama, como resultado de esa reacción, es preciso que se cumplan dos circunstancias:

- a. Contacto entre el combustible y el comburente
- b. Llevar la mezcla a una temperatura mínima de ignición.

En la Tablas N° 2.22 y 2.23 se presentan las temperaturas de llama máximas a conseguir de algunos combustibles y los colores de llama.

Tabla N° 2.22 Temperaturas de la llama para diversos combustibles

Combustible	Comburente	Temp. de los reaccionantes °C	Índice exceso de aire	Temp. Teórica °C	Temp. Real °C
Gas natural	Aire	15	1,00	1.961	1.880
Metano	Aire	15	1,00	1.915	1.880
Propano	Aire	15	1,00	1.980	1.925
Fuel - oil pesado	Aire	15	1,00	2.015	—
Fuel - oil pesado	Aire	15	1,30	1.690	—
Fuel - oil pesado	Aire	300	1,00	2.120	—

Fuente: "Curso de Calderas y Procesos industriales con Gas Natural", en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, en el periodo académico del 2004-1, Por el Profesor Percy Castillo Neyra.

³⁹ Becco, L. 1985, *Los G.L.P.*, Editorial Butano S.A. Madrid, España. p. 79.

Tabla N° 2.23 Temperaturas que corresponden a los colores de la llama

Color	°F	°C
Rojo Suave	875	475
Rojo suave a rojo oscuro	875 -1.200	475 – 650
Rojo oscuro a rojo cereza	1.200 – 1.375	650 – 750
Rojo cereza a rojo cereza brillante	1.375 – 1.500	750 – 825
Rojo cereza brillante a naranja	1.500 – 1.650	825 – 900
Naranja a amarillo	1.650 – 2.000	900 – 1.090
Amarillo a amarillo brillante	2.000 – 2.400	1.090 – 1.320
Amarillo brillante a blanco	2.400 – 2.800	1.320 – 1.540
Blanco a blanco deslumbrante	más de 2.800	más de 1.540

Fuente: “Curso de Calderas y Procesos industriales con Gas Natural”, en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, en el periodo académico del 2004-1, por el Profesor Percy Castillo Neyra.

2.2.10.2 EMISIVIDAD DE LLAMA

Como sabemos en las calderas pirotubulares la transmisión de calor en la cámara de combustión es mayoritariamente radiante y representa entre 50% y 65% de la transmisión de calor útil de la caldera, por lo tanto, es necesario considerar como afecta la llama de cada el tipo de combustible a la transmisión de calor en el hogar, es obvio que la temperatura de llama es factor muy importante, debido a que el calor radiante es directamente proporcional a la cuarta potencia de su valor, pero también es directamente proporcional al factor de emisividad. En la Tabla N° 2.24 se presenta el factor de emisividad de algunos combustibles.

Tabla N° 2.24 Factor de emisividad de combustibles

Tipo de combustible	Símbolo	Valor
Petróleo industrial N° 6 y 500	E	0,95
Gas natural	E	0,75
Gas de alto horno	E	0,4

Fuente: Steam generators Description and design de Donatello Annaratone.

2.2.10.3 TAMAÑO DE LLAMA.

Es importante conocer el tamaño de llama a fin confrontarlo con las medidas de la cámara de combustión, para el desarrollo de la llama a plena potencia se requiere que las medidas del hogar sean mayores al de la llama, sólo así tendremos las condiciones geométricas para una adecuada combustión, al mismo tiempo evitaremos el sobrecalentamiento de las paredes del hogar por impacto directo de llama. Las ecuaciones (2.51) y (2.52) que se presentan a continuación, han sido tomadas del “Curso Diseño de Calderas Piro-tubulares”, Francisco Latre Durso, Depósito legal n° Z-2355-2005 -España -<http://www.tecnologiocalderas.com> y permiten calcular las dimensiones teóricas de llama, según DIN 4787 y DIN 4788:

$$D = 0,17B^{1/3,5} \quad (2.51)$$

$$L = 0,2B^{1/2} \quad (2.52)$$

Donde:

B: Consumo de combustible en kg/h del equivalente del petróleo Industrial N° 6.

D: Diámetro de la llama en mm

L: Longitud de la llama en mm

También es posible obtener el tamaño de llama, de las curvas de operación a plena potencia de los quemadores que los fabricantes proporcionan, en ambos casos el hogar será mayor al tamaño de la llama.

2.3 CALDERAS

Se tratará de cubrir los conceptos básicos de tipos, partes, componentes y controles que son necesarios conocer a fin de evaluar una correcta adaptación y operación del sistema de combustión a gas natural. Para el caso de estudio, la investigación se centra en estudiar las calderas del tipo pirotubular.

Generalmente, en los procesos industriales que requieren calor para sus diversas aplicaciones, las calderas cumplen un rol determinante y casi siempre son indispensables en la generación de calor, normalmente como generadores de vapor, calentadores de fluido térmico, calentadores de agua caliente y agua sobrecalentada.

2.3.1 DEFINICIÓN⁴⁰

Caldera es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, en forma de calorías (ó MJ), a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

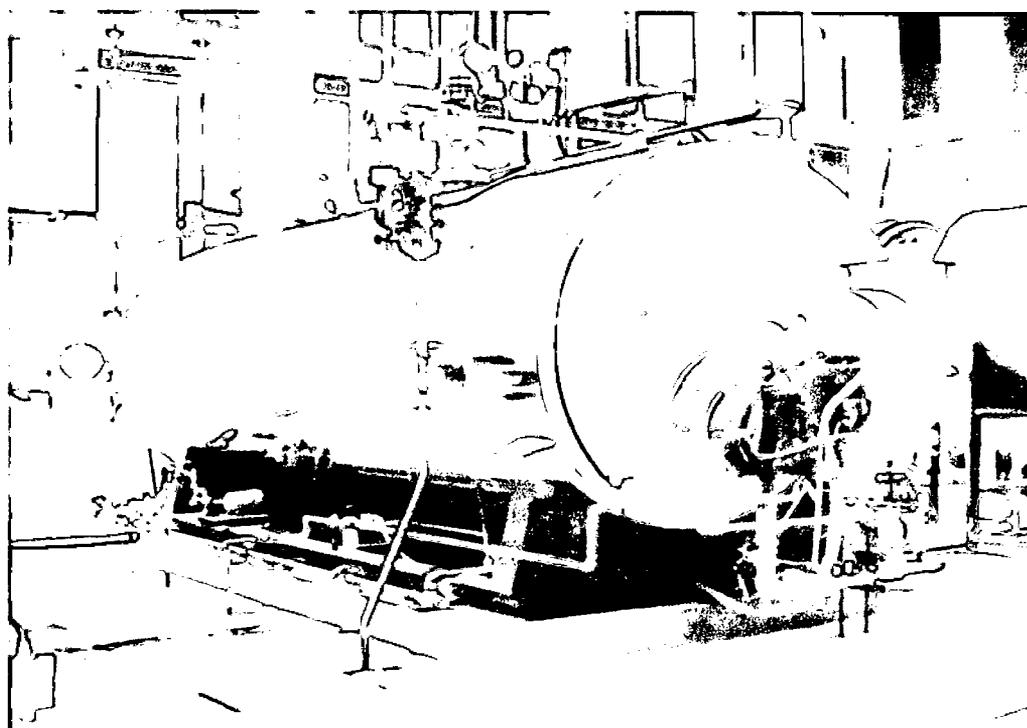
En las calderas tienen lugar dos operaciones importantes:

- a. La liberación del calor del combustible (combustión).
- b. La captación de este calor liberado por el fluido que circula por ella y en el que a veces, se produce un cambio de estado físico (Caldera de vapor).

⁴⁰ Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. España. Tema 3.1; p. 3.

En la Figura N° 2.3 se muestra un esquema de una caldera pirotubular de tres pasos con cámara semi seca.

Figura N° 2.3 Caldera pirotubular de tres pasos, Equipos Térmicos



2.3.2 CLASIFICACIÓN DE CALDERAS

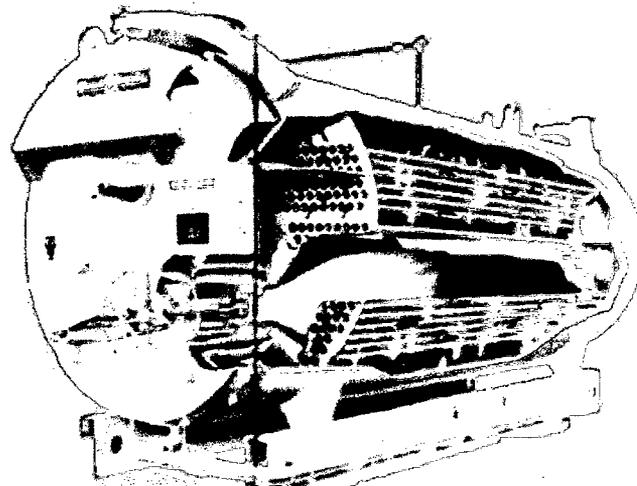
Según las normas ASME se pueden clasificar en tres tipos: (a) Calderas pirotubulares, (b) Calderas acuotubulares y (c) Calderas de resistencias eléctricas (electric boilers).

Según las Normas UNE sólo se consideran dos tipos de calderas: las pirotubulares y las acuotubulares⁴¹.

2.3.2.1 CALDERAS PIROTUBULARES

Caldera en la que los tubos están sumergidos en el fluido portador de calor, por el interior de los cuales circulan los gases calefactores (Ver Figura N° 2.4).

Figura N° 2.4 Caldera pirotubular de 4 pasos. Fabricado por Cleaver Brooks.

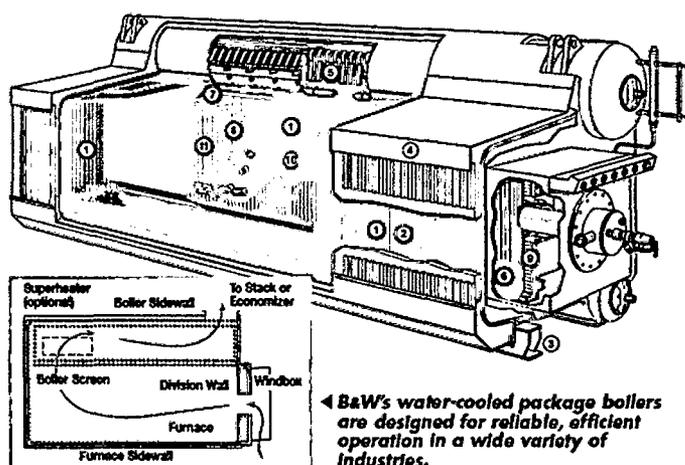


2.3.2.2 CALDERAS ACUOTUBULARES

Caldera en la que el fluido portador de calor circula por el interior de los tubos, la misma puede ser de circulación natural o de circulación forzada (Ver Figura N° 2.5).

⁴¹ Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. España. Tema 3.1; p. 11.

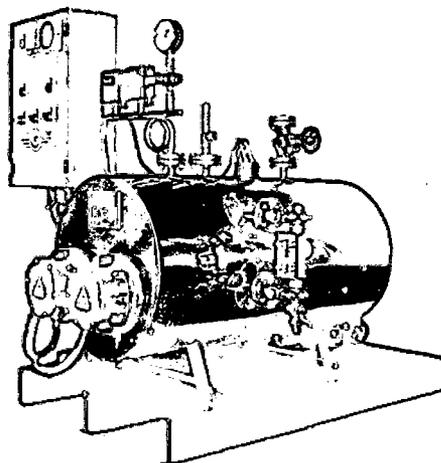
Figura N° 2.5 Caldera Acuotubular tipo D. Fabricado por Babcock & Wilcox.



2.3.2.3 CALDERAS DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Caldera que tiene serpentines de resistencias eléctricas sumergidas en el fluido portador de calor (Ver Figura N° 2.6).

Figura N° 2.6 Caldera de resistencias eléctricas.



2.3.3 OTRAS FORMAS DE CLASIFICAR LAS CALDERAS⁴²

A continuación se da un resumen de otras formas de clasificar a las calderas:

2.3.3.1 SEGÚN LA CIRCULACIÓN DE LOS FLUIDOS

a. Calderas de circulación natural

El movimiento del fluido caloportador se obtiene por convección natural.

b. Calderas de circulación forzada

El movimiento del fluido portador térmico se obtiene mediante una bomba que impulsa la totalidad del fluido a través de la caldera.

c. Calderas de circulación controlada o asistida

Caldera que presenta ciertas partes en las que el movimiento del fluido calorportante se obtiene por medio de una bomba.

2.3.3.2 SEGÚN LA TRANSMISIÓN DE CALOR

a. Calderas de convección

La transmisión de calor se realiza solamente mediante superficies de calefacción por convección.

b. Calderas de radiación

La transmisión de calor se realiza exclusivamente por medio de superficies de calefacción por radiación.

c. Calderas de radiación y convección

La transmisión de calor se realiza por medio de una combinación de superficies de calefacción por radiación y por convección.

⁴² Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. España. Tema 3.1; p. 11.

2.3.3.3 SEGÚN EL COMBUSTIBLE UTILIZADO

a. Calderas de carbón

Caldera diseñada y fabricada para utilizar como aporte calorífico el calor que se desprende en la combustión de un carbón. Las calderas de carbón pueden ser: de parrilla fija, de parrilla móvil y de carbón pulverizado.

b. Calderas de combustibles líquidos

Caldera diseñada para utilizar como aporte calorífico el calor desprendido en la combustión de un combustible líquido.

c. Calderas de combustibles gaseosos

Caldera diseñada para utilizar como aporte calorífico el calor desprendido en la combustión de un combustible gaseoso.

d. Calderas de recuperación de calor de gases

La caldera que utiliza, como fuente de aportación calorífica, el calor residual de gases o de gases calientes que proceden de un proceso industrial.

2.3.3.4 SEGÚN EL TIRO

a. Calderas de hogar presurizado

La caldera que estando en servicio mantiene en el hogar una presión superior a la atmosférica.

b. Calderas de hogar equilibrado o balanceada

La caldera que estando en servicio presenta en su hogar una presión ligeramente inferior a la atmosférica. Se usa para combustibles sólidos.

2.3.3.5 SEGÚN EL LUGAR DE MONTAJE

a. Calderas montadas en taller

La caldera construida y ensamblada totalmente en los talleres del fabricante y que se expide formando una unidad lista para entrar en servicio, previa conexión a las redes de agua, de vapor, de combustible y de la electricidad.

b. Calderas montadas in situ

La que se construye por secciones en el taller del fabricante, para ser ensamblada, hasta formar una unidad, en el lugar de su emplazamiento final.

2.3.3.6 SEGÚN SU IMPLANTACIÓN

a. Calderas terrestres

La caldera destinada a ser instalada en tierra firme, en contraposición de las calderas marinas.

b. Calderas marinas

La caldera diseñada para ser instalada en un buque.

2.3.3.7 SEGÚN SU UBICACIÓN

a. Calderas a la intemperie (outdoor)

En su diseño y construcción se ha previsto que su instalación permita no disponer de sala de calderas, y que va a estar sometida las condiciones climatológicas del lugar de emplazamiento.

b. Calderas protegidas contra la intemperie (indoor)

La caldera que se diseña para ser instalada dentro de una sala de calderas y estar protegida frente a las condiciones climatológicas del exterior.

2.3.3.8 SEGÚN SU OPERACIÓN

a. Calderas automáticas

Calderas que realizan su ciclo normal de funcionamiento sin precisar de acción manual alguna, salvo para su puesta inicial en servicio o en el caso de

haber actuado un órgano de seguridad de corte de aportación calorífica. También se consideran automáticas las calderas que realizan su ciclo normal de funcionamiento sin requerir una acción manual, salvo para cada puesta en marcha de un sistema de aportación calorífica después de que este haya sufrido un paro ocasionado por la acción de alguno de sus órganos de seguridad o de regulación.

b. Calderas semiautomáticas (automáticas de encendido manual)

Caldera de funcionamiento automático salvo el encendido del equipo de combustión que, cada vez que se apaga, debe volver a ponerse en servicio manualmente.

c. Calderas de operación manual

La caldera que precisa de una acción manual para realizar alguna de sus funciones de su ciclo normal de funcionamiento.

2.3.3.9 SEGÚN EL MEDIO DE TRANSPORTE DE CALOR

a. Calderas de vapor

Se utiliza como medio de transporte de calor el vapor de agua.

b. Calderas de agua caliente

Toda caldera en la que el medio de transporte de calor es agua a temperatura inferior a 110°C (para agua caliente sanitaria 60 -70°C).

c. Calderas de agua sobrecalentada

Toda caldera en la que el medio de transporte de calor es agua a temperatura superior a 110°C.

d. Caldera de fluido térmico

Toda caldera en la que el medio de transporte de calor es un líquido distinto del agua.

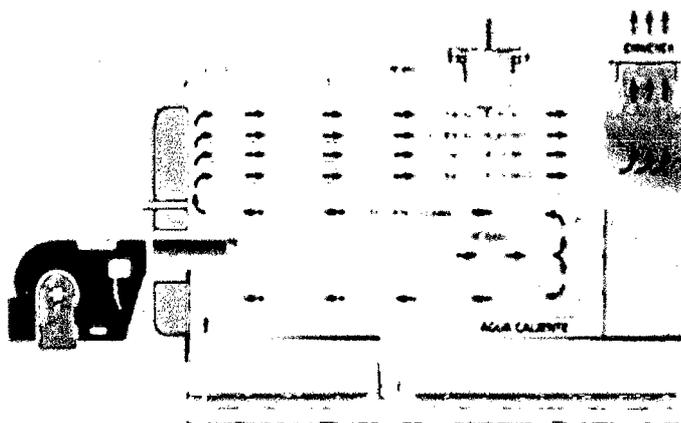
2.3.4 CALDERAS ESPECIALES

Mención especial para dos tipos de calderas poco difundidas pero con muchas ventajas operativas y constructivas sobre las calderas clásicamente conocidas, nos referimos a las calderas de llama reversa y las calderas de flujo forzado.

2.3.4.1 CALDERA DEL TIPO LLAMA REVERSA

Son calderas pirotubulares mejoradas, donde los gases de combustión, regresan en sentido contrario al desarrollo de la llama en el espacio comprendido entre la parte externa de la llama y las paredes del hogar. Estas calderas por el recorrido de los gases son llamadas como calderas de tres pasos, no tienen cámara posterior de gases por lo tanto no cuentan con tapa posterior refractaria ni tabiques refractarios, pero si tienen una pared posterior húmeda. Esta caldera es ideal para la utilización de petróleos líquidos ya que el tiempo de permanencia de los gases dentro del hogar es casi el doble que cualquier otra caldera con lo que se garantiza combustión completa minimizando la formación de inquemados (Ver Figura N° 2.7).

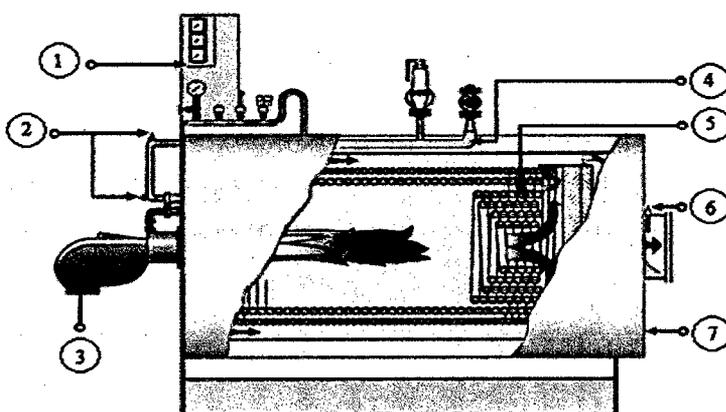
Figura N° 2.7 Caldera de llama reversa.



2.3.4.2 CALDERA DE FLUJO FORZADO

Son versiones mejoradas de calderas acuotubulares que no tienen domos inferiores ni superiores; en reemplazo del haz de tubos tiene uno o más serpentines concéntricos de tubos rolados de forma helicoidal, por el interior de los mismos el fluido calorportante viaja de forma turbulento a una velocidad determinada, produciéndose una transmisión del calor del tipo convectivo forzado en vez del tipo convectivo natural de las calderas clásicas. Obteniéndose con ello mayores ratios de transmisión de calor con lo que se logra equipos más eficientes y de menor peso. Estos equipos pueden operar como calentadores o generadores de vapor, en el primer caso el fluido ingresa de forma turbulento al serpentín a una temperatura inferior y sale del mismo a la misma velocidad a la temperatura superior, en el segundo caso el agua ingresa al serpentín a una velocidad determinada, en su recorrido el agua se calienta y se vaporiza saliendo de forma continuada como vapor saturado o sobrecalentado (Ver Figura N° 2.8).

Figura N° 2.8 Caldera de vapor de flujo forzado.



Leyenda

Ítem	Descripción
1	Tablero de control
2	Sensor para el sistema de seguridad de falta de agua, zona vapor
3	Quemador de dos etapas
4	Colector de vapor
5	Serpentín calefactor de agua, fácilmente reemplazable
6	Sensores para control de falta de agua lado de gases
7	Revestimiento protector aislante

2.3.5 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES PARA DEFINIR UNA CALDERA DE VAPOR

Se debe especificar las siguientes características:

- a. Potencia de la caldera
- b. Eficiencia.
- c. Tipo de combustible utilizado.
- d. Consumo de combustible.
- e. Presión Máxima de Operación.
- f. Presión de diseño.
- g. Superficie de calefacción convectivo y radiante
- h. Año de fabricación.
- i. Voltaje y frecuencia de operación fuerza y mando
- j. Carga térmica.
- k. Tipo de quemador.

2.3.6 CALDERA PIROTUBULAR

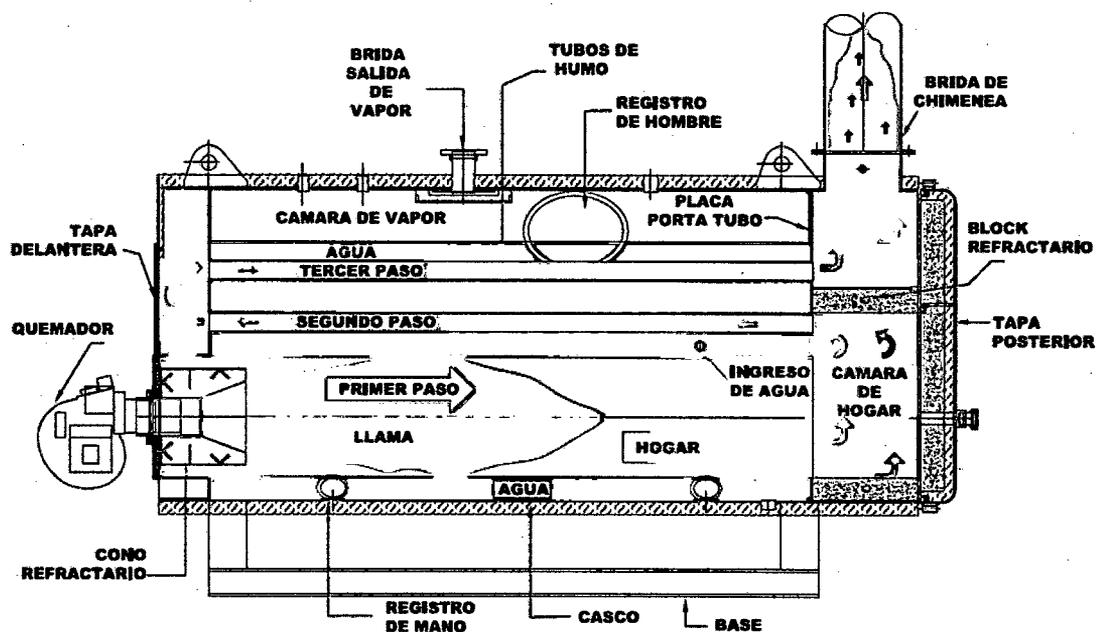
Este tipo de calderas es de uso generalizado en la industria nacional, principalmente, en su versión horizontal, por lo que amerita un conocimiento detallado de su construcción y partes a fin realizar intervenciones y/o modificaciones con destreza, garantizando su operación segura y eficiente con el gas natural.

2.3.6.1 NÚMERO DE PASOS

Se refiere a cada cambio de dirección de 180° que realizan los gases de combustión, en su recorrido interior en las calderas; el primer paso se da en el hogar

y los pasos siguientes se dan en los tubos de fuego. Pudiendo ser los mismos de dos, tres y cuatro pasos (Ver Figura N° 2.9).

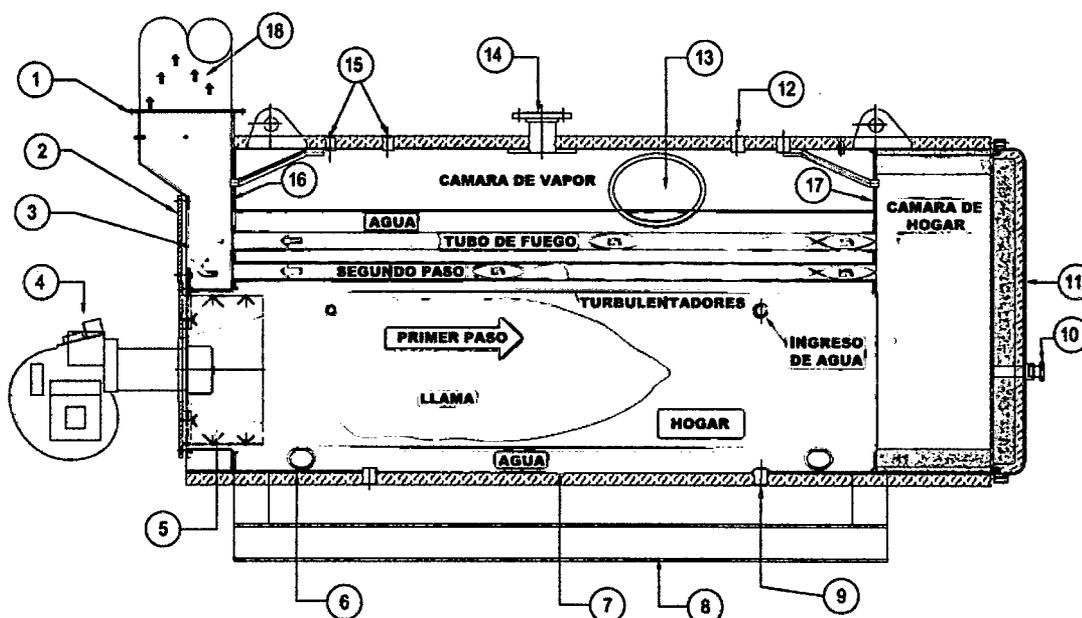
Figura N° 2.9 Caldera pirotubular de tres pasos.



2.3.6.2 PARTES DE UNA CALDERA PIROTUBULAR

En la Figura 2.10 se presenta las partes de una caldera pirotubular.

Figura N° 2.10 Caldera Pirotubular de dos pasos



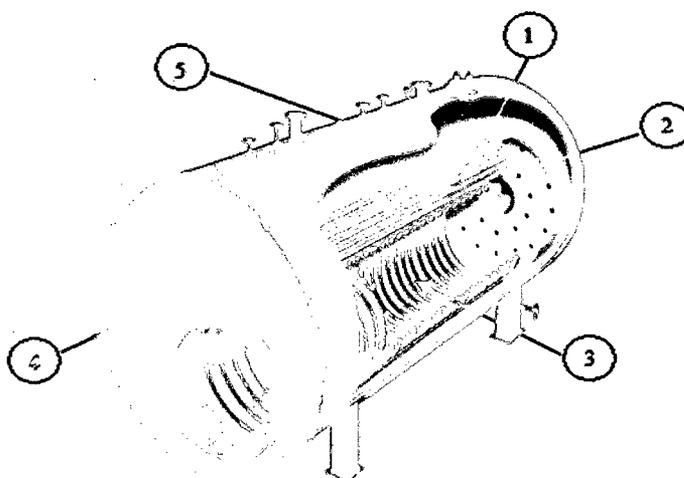
Leyenda

ITEM	DESCRIPCION	ITEM	DESCRIPCION
1	Brida de chimenea	10	Visor de llama
2	Tapa delantera	11	Tapa posterior
3	Cámara de gases delantera	12	Coplas de válvula de seguridad
4	Quemador	13	Registro de hombre
5	Cono refractario	14	Brida salida de vapor
6	Registro de mano	15	Coplas para controles
7	Casco	16	Placa porta tubo delantero
8	Base	17	Placa porta tubo posterior
9	Purga de fondo	18	Chimenea

2.3.6.2.1 CASCO

Es la envolvente cilíndrica fabricado en planchas de acero al carbono ASTM A285, grado C, cuyas uniones soldadas son evaluadas al 100% con ensayos radiográficos, normalmente viene a ser el cuerpo de la caldera, además opera a presión interna por lo que está sometida a fuerzas de tracción (Ver Figura N° 2.11).

Figura N° 2.11 Casco de caldera pirotubular

**Leyenda**

ITEM	DESCRIPCION
1	Tubos de fuego
2	Placa portatubo posterior
3	Hogar corrugado
4	Placa delantera
5	Casco

2.3.6.2.2 PLACA PORTATUBOS

Es una placa plana circular con decenas de agujeros taladrados con uno de estos diámetros (2", 2 ½" o 3"), donde se montan y hermetizan los tubos de fuego, también tiene un agujero mayor normalmente en la parte inferior donde se monta y suelda el hogar. En las zonas más débiles se sueldan templadores o stays para elevar su resistencia mecánica. Estas placas portatubos son conocidas también como placa delantera y placa posterior, están soldados a penetración total junto con el hogar en ambos extremos del casco. El material usado en su fabricación es el mismo que el casco (Ver Figura N° 2.12 y .13).

Figura N° 2.12 Placa posterior

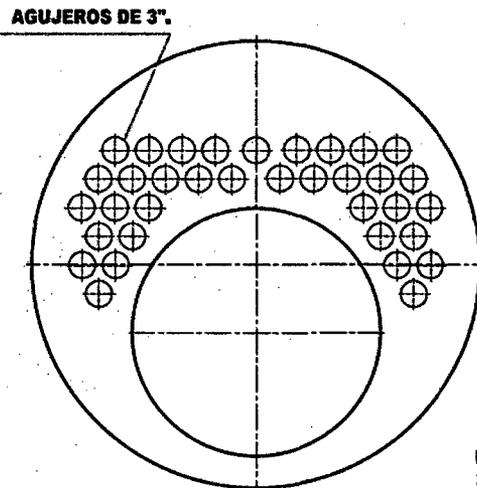
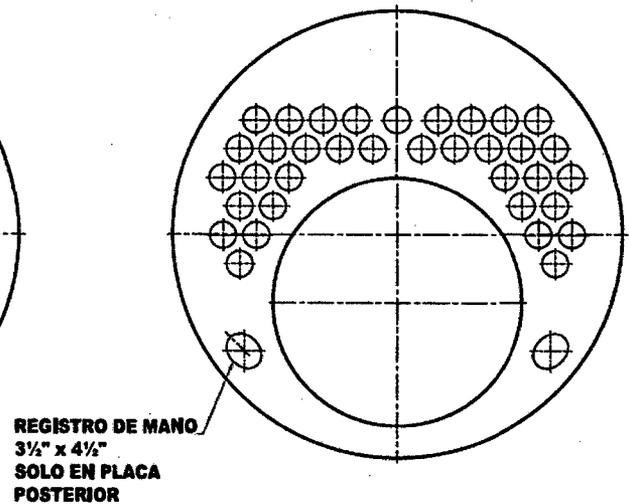


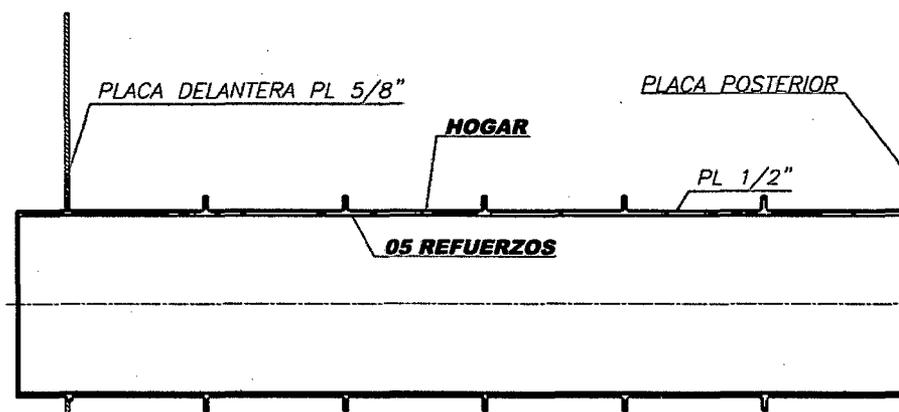
Figura N° 2.13 Placa delantera



2.3.6.2.3 HOGAR

Es un tubo cilíndrico que puede ser totalmente liso, liso con refuerzos o corrugado. Es donde se produce la combustión dando lugar a la formación de llama; la transmisión de calor es mayoritariamente del tipo radiante, aproximadamente entre 50% y 65% de todo el calor entregado por los gases de combustión al fluido calorportante se da en el hogar. Es el elemento de mayor exigencia térmica y mecánica de la caldera, soporta elevadas temperaturas y opera con presión externa por lo que está sometido a fuerzas de compresión por ello las fórmulas usadas para su cálculo son totalmente diferentes a las usadas para diseño del casco (Ver Figura N° 2.14).

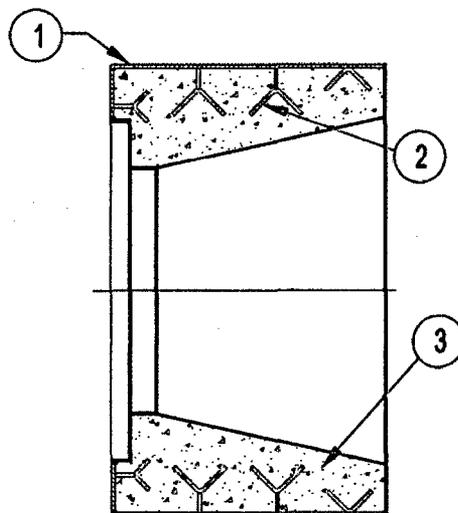
Figura N° 2.14 Hogar liso con refuerzo



2.3.6.2.4 CONO REFRACTARIO

Es un block de castable refractario cuya forma externa es cilíndrica y la parte interna es de forma troncocónica. Tiene la función de proteger las partes metálicas expuestas al calor que no están refrigeradas por el agua, pero también con el calor almacenado eleva la temperatura local mejorando las condiciones térmicas, que ayudan a gasificar los combustibles líquidos para su mejor combustión (Ver Figura N° 2.15).

Figura N° 2.15 Cono refractario



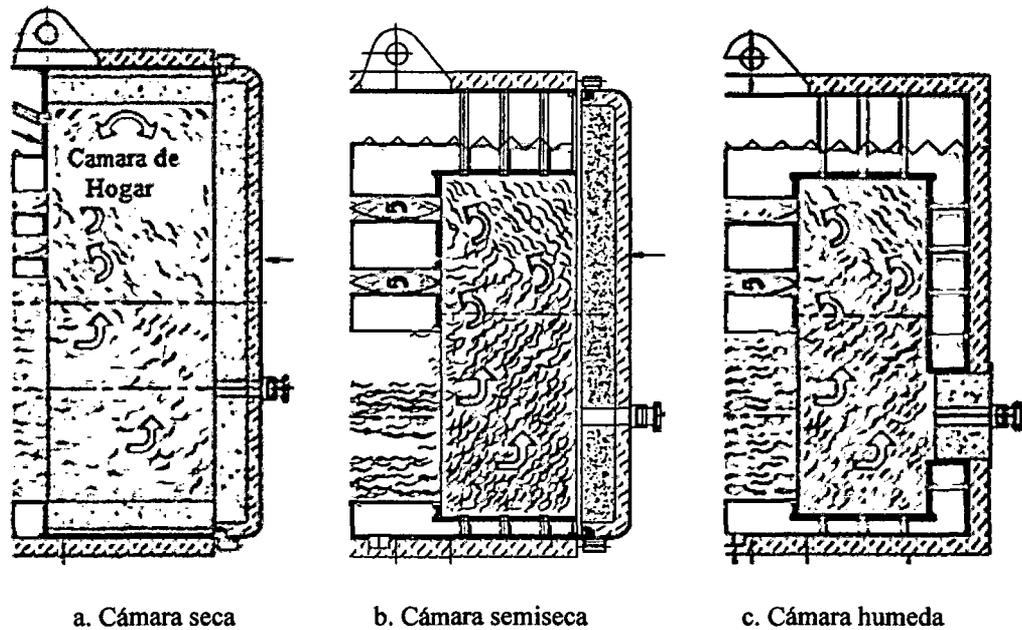
Leyenda

ITEM	DESCRIPCION
1	Plancha de acero inoxidable
2	Anclaje de acero inoxidable
3	Castable

2.3.6.2.5 CÁMARA DE HOGAR

Es el elemento que recibe los gases calientes de combustión y es aquí donde se produce el cambio de dirección del primer paso al segundo paso, es la zona de mayor temperatura después del hogar. La cámara de hogar (cámara trasera) puede ser del tipo cámara seca, cámara semiseca y cámara húmeda (Ver Figura N° 2.16).

Figura N° 2.16 Cámara de hogar



2.3.6.2.6 TUBOS DE FUEGO

Son los elementos tubulares encargados de conducir por su interior los gases de combustión desde la cámara de hogar hasta la chimenea, corresponden al haz de tubos del segundo, tercer y /o cuarto paso de las calderas. El proceso de transferencia de calor en estas zonas es del tipo convectivo, las calderas y dos pasos llevan instalados unos turbuladores llamados también extractores de calor a fin de

mejorar la eficiencia de la caldera. Los materiales típicamente usados son el ASTM A178 y/o el ASTM A192.

2.3.6.2.7 CÁMARA DE HUMOS DELANTERO

Es el elemento que permite el cambio de sentido de los humos en su recorrido hasta la chimenea. Suele haber delantero y trasero.

2.3.6.2.8 BRIDA DE LA CHIMENEA

Es la brida donde se empalma el ducto de evacuación de los gases de combustión conocido también como la chimenea. La chimenea debe tener una altura tal que sobrepase como mínimo en 1,5 m de la construcción más cercana y debe descargar a los cuatro vientos.

2.3.6.2.9 SALIDA DE VAPOR

Es la brida donde se instala la tubería de salida del vapor saturado, tiene un diámetro tal que la velocidad de salida es menor a 30,48 m/s a fin de evitar arrastre de agua.

2.3.6.2.10 REGISTRO DE HOMBRE

Llamado también manhole, es un agujero elíptico de apertura y cerrado rápido que permite el ingreso de una persona para la inspección y mantenimiento interior de la caldera. Sus medidas estandares son de 11"x 15" ó 12"x16".

2.3.6.2.11 REGISTRO DE MANO

Es un agujero elíptico de apertura y cerrado rápido que permite la inspección visual y lavado interior con agua a presión. Sus medidas estandares son de 3"x4", 3 ¼"x4 1/2" y 3 ½"x4 1/2".

2.3.6.2.12 TAPA POSTERIOR

Es el elemento que permite el acceso a la cámara de hogar, placa posterior, hogar y a los tubos de juego, está fabricado en acero al carbono y revestido con material refractario y aislante térmico.

2.3.6.2.13 TAPA DELANTERA

Es el elemento que permite el acceso a la cámara de humos delantera, placa delantera y tubos de juego, está fabricado en acero al carbono y revestido con material aislante.

2.3.6.2.14 COPLA DE INGRESO DE AGUA

Es la conexión donde se conecta la tubería del ingreso del agua blanda de alimentación, se instala una válvula tipo compuerta y dos válvulas de no retorno del tipo check disco.

2.3.6.2.15 CÁMARA DE VAPOR

Es el espacio donde se acumula el vapor saturado que se genera en el interior de la caldera.

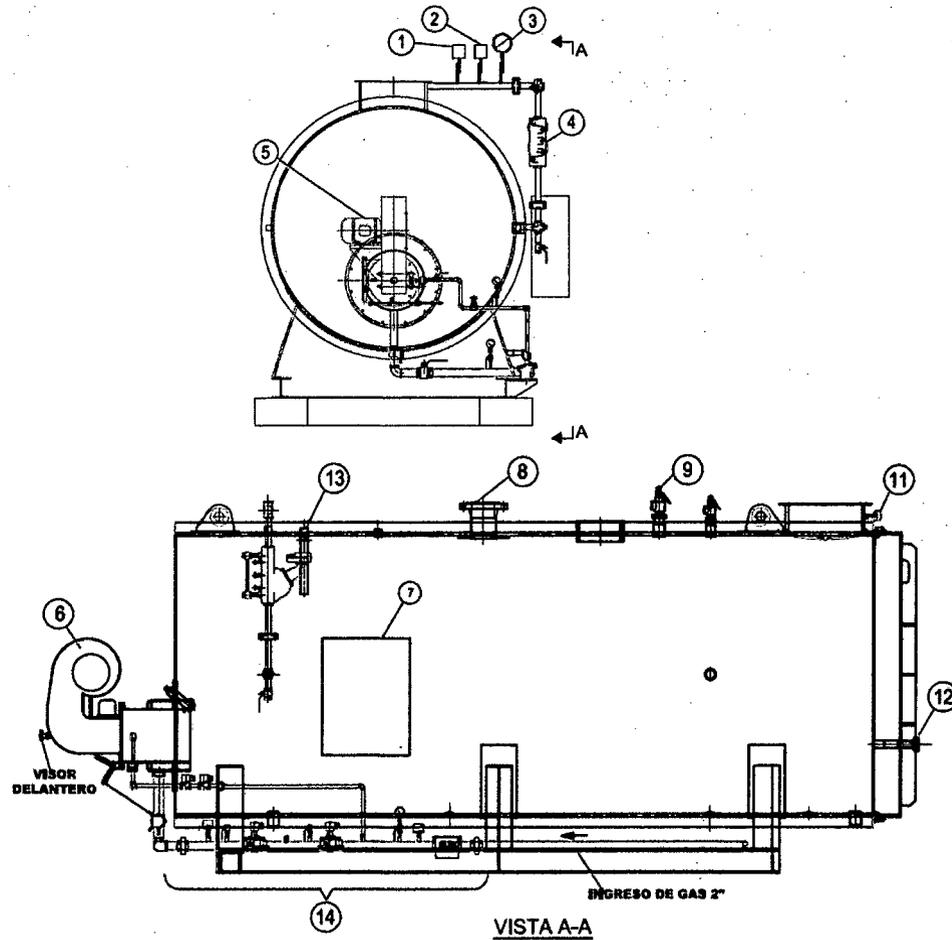
2.3.6.2.16 COPLA DE PURGA DE FONDO

Es la conexión donde se conecta la tubería de purga de fondo; se instala una válvula o dos válvulas de apertura rápida con manija tipo palanca y una válvula globo tipo Y de apertura lenta en serie con las anteriores, con los que se elimina las impurezas y lodos acumulados en el lado del agua de la caldera.

2.3.7 CONTROLES DE UNA CALDERA

Se describe los controles típicos de una caldera pirotubular, el controlador de llama se detallará en el capítulo de quemadores (Ver Figura N° 2.17).

Figura N° 2.17 Controles de una Caldera piro-tubular de gas natural



Leyenda

ITEM	DESCRIPCION
1	Presostato de seguridad
2	Presostato de modulación
3	Manómetro principal
4	Control de nivel MDM
5	Motor del ventilador.
6	Quemador
7	Tablero eléctrico
8	Salida de vapor
9	Válvula de seguridad
10	Salida de gases
11	Termómetro de gases
12	Visor posterior
13	Purga de fondo

2.3.7.1 CONTROL DE NIVEL

Instrumento que controla el nivel adecuado del agua dentro de la caldera y da pase al encendido del quemador dentro de los niveles adecuados del agua. Es a la vez el instrumento de seguridad más importante, puesto que su operación defectuosa, casi siempre ocasiona una falla catastrófica de la caldera. El control de nivel de uso generalizado en nuestro medio es de *Macdonnel & Müller* en sus diferentes modelos principalmente el modelo 157S (Ver Figura N° 2.18).

Entre las principales funciones de este control se puede mencionar:

- a. Comanda la operación de la bomba de alimentación de agua controlando la secuencia de arranque y parada de la electrobomba en función al requerimiento del agua de la caldera.
- b. Detecta el bajo nivel de agua y apaga el quemador a pesar de estar energizado la electrobomba de alimentación de agua.
- c. Activa una señal luminosa y/o alarma sonora de emergencia por nivel bajo al tiempo que apaga el quemador.

Figura N° 2.18 Control de nivel MDM modelo 157



2.3.7.2 PRESOSTATO DE SEGURIDAD

Llamado también presostato de parada-arranque, es el instrumento que apaga

el quemador cuando la presión de vapor alcanza la presión de operación (presión de seteo) y prende el quemador cuando la presión cae hasta una presión determinada según el diferencial seleccionado. En un quemador tipo llama modulante. Tanto el apagado y prendido del mismo se realiza cuando el quemador está en la condición de llama chica (Ver Figura N° 2.19).

2.3.7.3 PRESOSTATO DE MODULACIÓN

Conocido también como reóstato de modulación, es el instrumento que controla el tamaño de llama de un quemador modulante, detecta la variación de presión de vapor y responde variando su resistencia el cual es transmitido al motor modutrol que responde incrementando o disminuyendo la cantidad de combustible y aire de combustión. Cuando la presión aumenta el tamaño de llama disminuye, o, a la inversa, cuando la presión disminuye, el tamaño de llama aumenta; por lo tanto, se tiene una infinidad de llamas entre la llama chica y la llama grande (Ver Figura N° 2.20).

Figura N° 2.19 Presostato L404 F

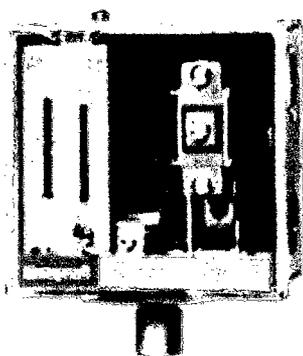
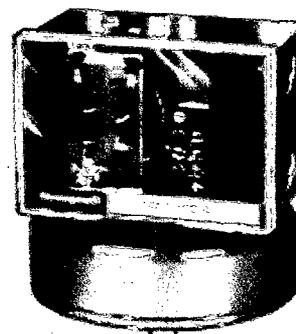


Figura N° 2.20 Reostato L91B



2.3.7.4 CONTROL DE NIVEL MÍNIMO POR ELECTRODOS.

Es el segundo elemento de seguridad por bajo nivel de agua, en caso de no responder el MDM, apaga el quemador por bajo nivel de agua. Está conformado por un electrodo inmerso en el agua y un relay eléctrico (Ver Figura N° 2.21 y 2.22).

Figura N° 2.21 Porta electrodo

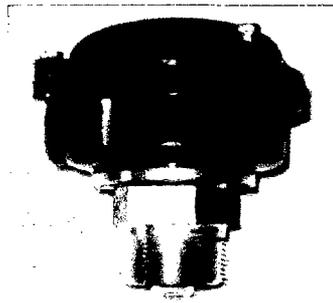
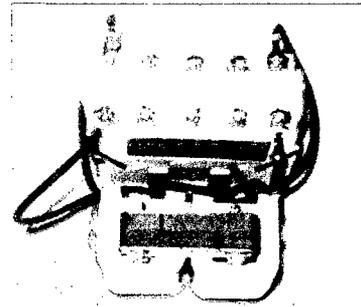


Figura N° 2.22 Relay eléctrico



2.3.7.5 VÁLVULA DE SEGURIDAD

Es el elemento mecánico que alivia la presión de la caldera descargando el vapor al medio ambiente en el caso de que el presostato de parada y arranque no responda o ante un incremento de presión repentino. Su selección, instalación y seteo se realiza bajo las normas ASME o las normas UNE (Ver Figura N° 2.23).

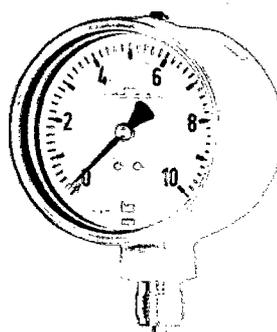
Figura N° 2.23 Válvula de seguridad



2.3.7.6 MANÓMETRO PRINCIPAL

Es el elemento indicador de la presión del vapor de la caldera, sirve para control visual y monitoreo de la presión de operación de la caldera (Ver Figura N° 2.24).

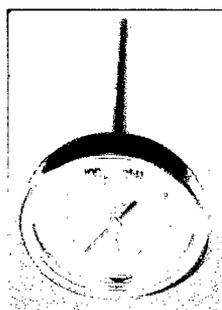
Figura N° 2.24 Manómetro principal



2.3.7.7 TERMÓMETRO DE GASES

Es el instrumento indicador de la temperatura de gases, que sirve para evaluar la correcta operación de la caldera; la temperatura, como máximo, deberá ser 50°C más que la temperatura del vapor correspondiente a las condiciones de saturación a la presión de operación (Ver Figura N° 2.25).

Figura N° 2.25 Termómetro de gases



2.4 QUEMADORES

En el campo de la combustión y quemadores existen un gran número de quemadores por cada tipo de combustible, si bien es cierto sus funciones son las mismas, los quemadores se diferencian en su diseño, construcción y operación.

Además, existen grandes diferencias entre los quemadores por cada tipo de combustible, es así que un quemador de combustible líquido no podrá ser utilizado para combustibles gaseosos, sin una previa modificación, y tampoco con combustibles sólidos.

En este capítulo sólo nos limitaremos al estudio de los quemadores con formación de llama en boca (quemadores de difusión), tanto para combustibles líquidos, gaseosos y mixtos, profundizando en sus partes y componentes, así como en su operación y controles.

2.4.1 DEFINICIONES IMPORTANTES

2.4.1.1 QUEMADOR AUTOMÁTICO

Son aquellos provistos de dispositivos de control de llama, encendido, mando y regulación de acción automática⁴³.

2.4.1.2 QUEMADORES SEMIAUTOMÁTICOS

Son aquellos provistos de dispositivos de control de llama, mando y regulación de acción automática, en los cuales el encendido se efectúa manualmente⁴⁴.

⁴³ Norma Argentina 1985. *Disposiciones, Normas y recomendaciones para uso de gas natural*. NAG 201, Buenos Aires, Argentina. p. 9.

⁴⁴ *Ibid.*, p. 9.

2.4.1.3 QUEMADORES MANUALES

Son aquellos provistos de dispositivos de control de llama y mando de acción automática, en los cuales el encendido y la regulación se realizan manualmente⁴⁵.

2.4.1.4 QUEMADOR DE AIRE FORZADO

Quegador en el que el aire de combustión está conducido por un ventilador⁴⁶

2.4.1.5 QUEMADOR MIXTO

Denominado también quemador bicombustible, está diseñado para la combustión simultánea o alterna de dos combustibles.

2.4.1.6 QUEMADOR CON PREMEZCLADO EN CABEZA

Quegador en el que la totalidad o una parte del aire necesario para la combustión, se mezcla con el gas en los orificios de salida o a la salida de estos⁴⁷.

2.4.1.7 CONDICIONES DE REFERENCIA

Las condiciones de referencia o condiciones estándares corresponden a 15°C, 1013,25 mbar según norma EN 437⁴⁸.

2.4.1.8 PUESTA FUERA DE SERVICIO

Es el bloqueo del pasaje del combustible al quemador o conjunto de éstos por la acción del sistema de seguridad implementado. Cuando la misma se produzca por condiciones límite de seguridad, el quemador sólo podrá ponerse en funcionamiento nuevamente después de desbloquear manualmente el dispositivo de mando⁴⁹.

⁴⁵ Norma Argentina 1985. *Disposiciones, Normas y recomendaciones para uso de gas natural*. NAG 201, Buenos Aires, Argentina. p. 9.

⁴⁶ Norma Española 1997, Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676, España. p. 7.

⁴⁷ Ibid., p. 8.

⁴⁸ Ibid., p. 8.

⁴⁹ Norma Argentina NAG 201, Op. cit., p. 9.

2.4.1.9 REARRANQUE

Es el intento de encendido del quemador cumpliendo todas las secuencias de arranque, cuando la llama se extinguió estando el quemador en servicio⁵⁰.

2.4.1.10 REENCENDIDO

Es el intento de encendido del quemador cuando la llama se extinguió estando el mismo en servicio⁵¹.

2.4.1.11 TIEMPO DE PREBARRIDO

Período durante el que se efectúa el prebarrido con un caudal de aire controlado, antes de la puesta bajo tensión del dispositivo de encendido⁵².

2.4.1.12 TIEMPO DE ENCENDIDO

Período entre la apertura de la alimentación del gas y la primera indicación de llama por el detector de llama⁵³.

2.4.1.13 TIEMPO DE SEGURIDAD DE ARRANQUE

Período comprendido entre el comienzo del proceso de encendido del quemador y la interrupción de éste si no se produce el mismo⁵⁴.

2.4.1.14 TIEMPO DE POSTBARRIDO

Período entre la parada del quemador y la puesta fuera de tensión del ventilador⁵⁵.

⁵⁰ Norma Argentina 1985. *Disposiciones, Normas y recomendaciones para uso de gas natural*. NAG 201, Buenos Aires, Argentina. p. 9.

⁵¹ *Ibid.*, p. 9.

⁵² Norma Española. 1997. Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676. España. p. 8.

⁵³ *Ibid.*, p. 12.

⁵⁴ Norma Argentina NAG 201, *Op. cit.*, p. 10.

⁵⁵ Norma Española 676, *Op. cit.*, p. 12.

2.4.1.15 TIEMPO DE ESPERA

Período comprendido entre la puesta fuera de servicio por seguridad de combustión y el reinicio de la secuencia de encendido.

2.4.1.16 PILOTO CONTINUO

Es aquel que permanece funcionando durante todo el período de servicio del equipo independientemente de la operación del quemador principal⁵⁶.

2.4.1.17 PILOTO INTERMITENTE

Es aquel que enciende automáticamente cada vez que es necesario encender el quemador principal y permanece en operación mientras el mismo está funcionando⁵⁷.

2.4.1.18 PILOTO INTERRUMPIDO

Es aquel que enciende automáticamente cada vez que es necesario encender el quemador principal, apagándose una vez finalizado el tiempo de encendido del mismo⁵⁸.

2.4.1.19 BARRIDO

Caudal de aire suministrado a través de la cámara de combustión, y/o de los circuitos de los productos de combustión, destinados a evacuar cualquier mezcla de aire con el gas y/o de los productos de combustión⁵⁹.

2.4.1.20 PREBARRIDO

Barrido que tiene lugar entre la señal de arranque y la puesta en funcionamiento del dispositivo de encendido⁶⁰.

⁵⁶ Norma Argentina 1985. *Disposiciones, Normas y recomendaciones para uso de gas natural*. NAG 201, Buenos Aires, Argentina. p. 10.

⁵⁷ *Ibid.*, p. 10.

⁵⁸ *Ibid.*, p. 10.

⁵⁹ Norma Española 1997. *Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos*. UNE-EN 676. España. p. 12.

2.4.1.21 POSBARRIDO

Barrido que se efectúa inmediatamente después de una parada por operación⁶¹.

2.4.1.22 DISPOSITIVO DE CONTROL DE LLAMA

Conjunto de elementos que permiten verificar la presencia de llama en el quemador⁶².

2.4.1.23 DISPOSITIVO DE MANDO

Conjunto de elementos que permiten controlar que el funcionamiento del equipo se realice dentro de un programa preestablecido, según las condiciones de seguridad exigidas y los parámetros operativos del mismo cuando así se requiera⁶³.

2.4.1.24 AUTO VERIFICACIÓN

Sistema que permite verificar en su totalidad el dispositivo de control de llama (sensor, relay, etc.)⁶⁴.

2.4.1.25 VÁLVULA AUTOMÁTICA DE CIERRE⁶⁵

La válvula automática de cierre (VAC) es una válvula que cierra o abre automáticamente el paso de gas al quemador principal o quemador piloto, según la señal que reciba del dispositivo de mando correspondiente y puede ser:

- a. VAC de acción directa

⁶⁰ Norma Española. 1997. Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676. España. p. 12.

⁶¹ Ibid., p. 12.

⁶² Norma Argentina 1985. Disposiciones, Normas y recomendaciones para uso de gas natural. NAG 201, Buenos Aires, Argentina. p. 10.

⁶³ Ibid., p. 10.

⁶⁴ Ibid., p. 10.

⁶⁵ Ibid., p. 10.

La acción de cierre o apertura de la válvula no depende del fluido controlado (gas natural). La fuerza necesaria para provocar su cierre o apertura -según sea normal cerrada o normal abierta - depende de la acción de un resorte antagónico.

b. VAC con rearme manual:

Válvula que cierra automáticamente el paso de fluido según la señal que reciba del correspondiente dispositivo de mando. Su apertura se efectúa manualmente y por medios mecánicos (palanca de reposición). Serán del tipo normal cerrada y de acción directa.

2.4.1.26 CONSUMO VOLUMÉTRICO

Volumen de gas consumido por el quemador en funcionamiento permanente, durante la unidad de tiempo.

2.4.1.27 CONSUMO VOLUMÉTRICO NOMINAL

Consumo volumétrico indicado por el fabricante expresado en metros cúbicos por hora (m^3/h).

2.4.1.28 ESTABILIDAD DE LLAMA

Características de las llamas que se mantienen establemente posicionadas en la cabeza del quemador, o en la zona de recepción de las llamas previstas por construcción⁶⁶.

2.4.1.29 DESPRENDIMIENTO DE LLAMA

Fenómeno caracterizado por el alejamiento total o parcial de la base de la llama fuera de la cabeza del quemador, o de la zona de recepción de llama prevista por construcción⁶⁷.

⁶⁶ Norma Española. 1997. Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676. España. p. 12.

2.4.1.30 RETROCESO DE LLAMA

Movimiento no deseado del frente de llama hacia un punto situado antes de su posición normal de funcionamiento estable⁶⁸.

2.4.2 DEFINICIÓN DEL QUEMADOR

Quemador es el equipo destinado específicamente a producir la reacción exotérmica de la combustión de forma automática y segura⁶⁹.

Figura N° 2.26 Quemador Autoquem



2.4.3 FUNCIONES DEL QUEMADOR⁷⁰

Las funciones del quemador son las siguientes:

- a. Aportar combustible a la cámara de combustión en condiciones de ser quemado.
- b. Atomización (en el caso de líquidos.)
- c. Aportar aire o comburente a la cámara de combustión.
- d. Controlar la relación aire combustible.
- e. Mezclar íntimamente el aire y el combustible.

⁶⁷ Norma Española. 1997. Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676. España. p. 12.

⁶⁸ Ibid., p. 12.

⁶⁹ Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. España. Tema 2.1; p. 3.

⁷⁰ Ibid., p. 3.

- f. Encender y quemar la mezcla.
- g. Monitorear y controlar la llama.
- h. Operación segura según secuencia del programador utilizado.
- i. Desplazar los productos de la combustión

2.4.4 CLASIFICACIÓN DE QUEMADORES⁷¹

Los quemadores, en general, se clasifican según los siguientes criterios:

- a. De acuerdo con el combustible.
- b. Desde el punto vista de los hogares.
- c. Por la forma constructiva.
- d. Por la duración del servicio.
- e. Por la admisión del aire.
- f. Atendiendo a la mezcla de combustible y comburente.
- g. Desde el punto de vista de su funcionamiento.
- h. Desde el punto de regulación.

2.4.4.1 DE ACUERDO CON EL COMBUSTIBLE

- a. Quemadores de combustibles gaseosos.
- b. Quemadores de combustible líquido.
- c. Quemadores mixtos.
- d. Quemadores de combustible sólido.

2.4.4.2 DESDE EL PUNTO VISTA DE LOS HOGARES

- a. Quemadores para hogares en depresión.
- b. Quemadores para hogar atmosférico.

⁷¹ Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. España. Tema 2.1; p. 7.

- c. Quemadores para hogares presurizados.

2.4.4.3 POR LA FORMA CONSTRUCTIVA

- a. Quemadores compactos.
- b. Quemadores disgregados.

2.4.4.4 POR LA DURACIÓN DEL SERVICIO

- a. Quemadores para servicio intermitente.
- b. Quemadores para servicio permanente.

2.4.4.5 POR LA ADMISIÓN DEL AIRE

- a. Quemadores atmosféricos.
- b. Quemadores con ventilador.

2.4.4.6 ATENDIENDO A LA MEZCLA DE COMBUSTIBLE Y COMBURENTE

- a. Difusión, (sin mezcla previa)

La mezcla se realiza en el instante de la combustión.

- b. Premezcla

La mezcla se realiza parcial o totalmente antes de alcanzar la cámara de combustión.

2.4.4.7 DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU FUNCIONAMIENTO

- a. Quemadores manuales.
- b. Quemadores semiautomáticos.
- c. Quemadores automáticos.

2.4.4.8 DESDE EL PUNTO DE REGULACIÓN

- a. Quemador on-off.
- b. Quemador alto y bajo fuego (low-high-low).

c. Quemador modulante.

2.4.5 PARÁMETROS DE LOS QUEMADORES⁷²

Los datos fundamentales para definir un quemador son:

- a. Potencia térmica o potencia nominal.
- b. Modulación del quemador.
- c. Tiempo de combustión.
- d. Impulsión.
- e. Potencia específica.

2.4.5.1 POTENCIA TÉRMICA O POTENCIA NOMINAL

Es la cantidad de calor que puede proporcionar un quemador, a una determinada contrapresión del hogar. Se calcula como el producto del caudal del combustible por el poder calorífico inferior.

2.4.5.2 MODULACIÓN DEL QUEMADOR

Llamado también como turndown o rangeabilidad es la relación entre la potencia nominal máxima y la mínima que un quemador es capaz de proporcionar un funcionamiento correcto de llama estable y combustión completa.

Rangeabilidad alta para gas 10:1 y para líquidos 8:1; rangeabilidad baja 4:1

2.4.5.3 TIEMPO DE COMBUSTIÓN

Es el tiempo transcurrido entre el instante en que un volumen infinitesimal de mezcla llega al frente de llama y el momento en que ese mismo volumen se ha quemado totalmente.

⁷² Tecnología de la combustión. 2008. Universidad de Valladolid. España. Tema 2.1; p. 4.

2.4.5.4 IMPULSIÓN

Es la fuerza que se ejerce sobre el combustible en su descarga y suele ser la suma de dos términos: la cantidad de movimiento del combustible y la presión estática.

2.4.5.5 POTENCIA ESPECÍFICA

Es el cociente entre la cantidad de calor suministrado por el quemador (potencia térmica o nominal) y la sección de los orificios de salida del mismo.

2.4.6 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE QUEMADORES

Los criterios que se deben tener en cuenta para la selección de quemadores son:

- a. Calor a aportar.
- b. Contrapresión de la cámara.
- c. Altura sobre el nivel del mar.
- d. Temperatura del aire de combustión.
- e. Grado de modulación.
- f. Tipo de caldera.
- g. Lugar donde será instalado.
- h. Características del hogar de combustión.
- i. Ruido niveles de emisión acústica.
- j. Límites de emisión contaminantes a cumplir.

2.4.7 QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.

Existen tres tipos de quemadores de difusión ampliamente utilizados con combustibles líquidos que son:

- a. Quemadores de una etapa (On – off).
- b. Quemadores bajo/alto/ bajo fuego.
- c. Quemadores modulantes.

2.4.7.1 QUEMADORES DE UNA ETAPA (ON –OFF)

Estos quemadores solo se usan con diesel 2 o similar hasta un rango de potencia de 350 kW, eventualmente también son usados hasta 600 kW pero su operación en el arranque es un tanto ruidoso (Ver Figura N° 2.29).

Los quemadores On-off son de una sola llama, cuyo encendido es con chispa eléctrica producido con corriente eléctrica a alta tensión, este circuito está conformado por dos electrodos de encendido colocados directamente sobre la tobera de atomización y un transformador de encendido de dos polos de 10.000 V (Ver Figuras N° 3.27 y 3.28).

Figura N° 2.27 Transformador de ignición
encendido

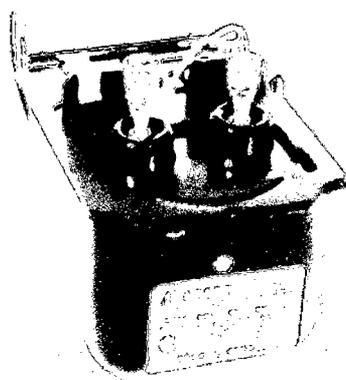


Figura N° 2.28 Electrodo de encendido

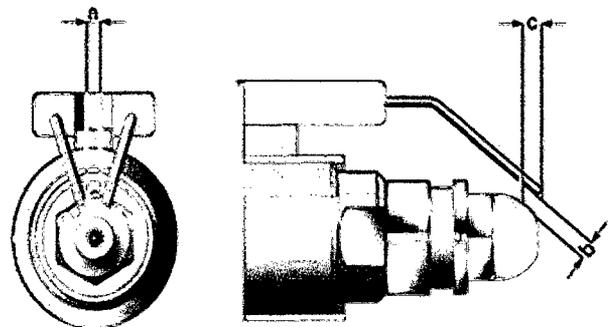
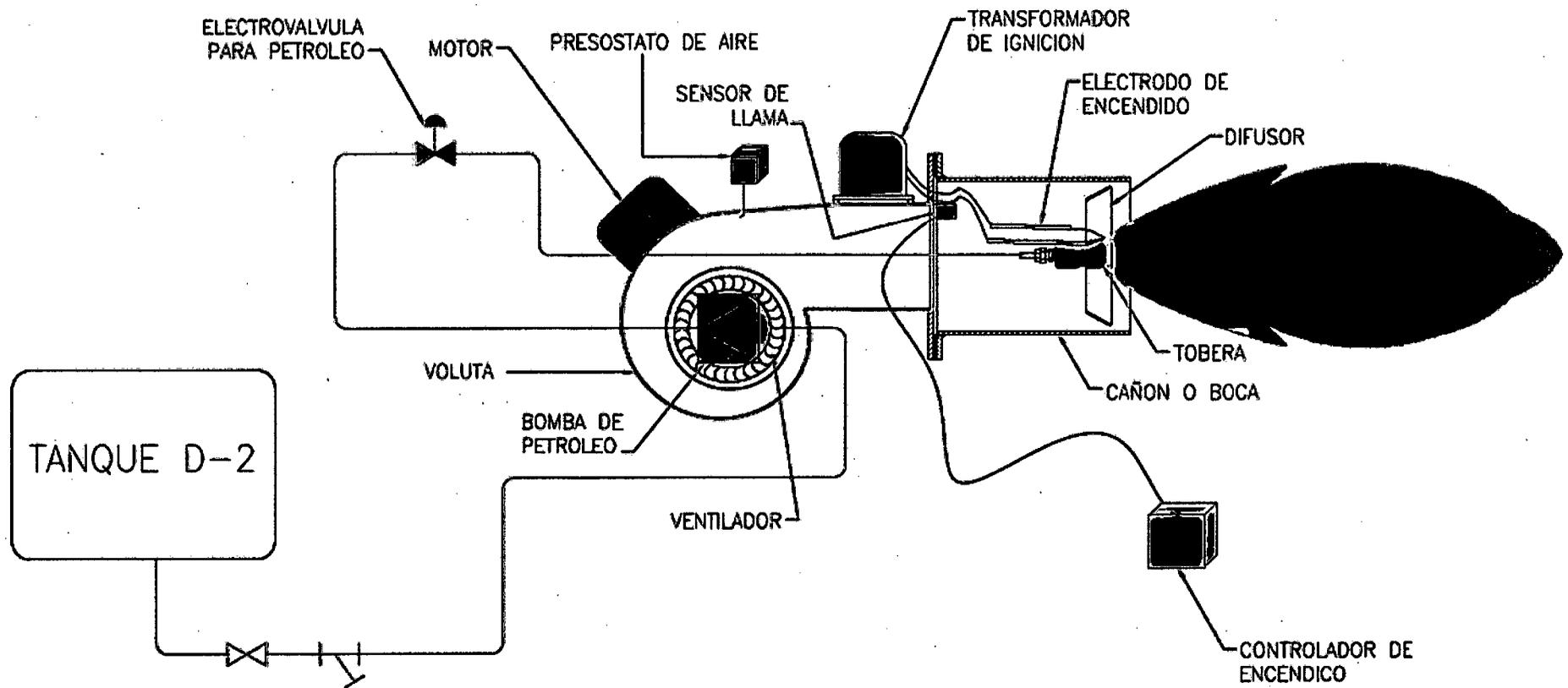


Figura N° 2.29 Diagrama de flujo de un quemador de una etapa (on -off)



Para producir la llama se requiere el aire de combustión inyectado por un ventilador y el combustible atomizado justo en el momento en el que se produce la chispa, para lo cual el circuito de atomización formado por una bomba de engranajes inyecta el combustible entre 100 – 150 psi (6.89 – 10,34 bar) a la tobera de atomización cuya función es pulverizar el combustible en millones de gotas de tamaño promedio de 40 micras.

Figura N° 2.30 Bomba de petroleo

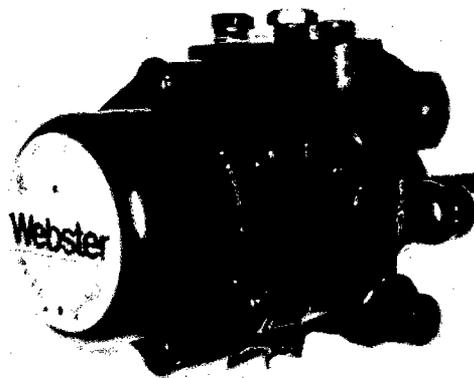
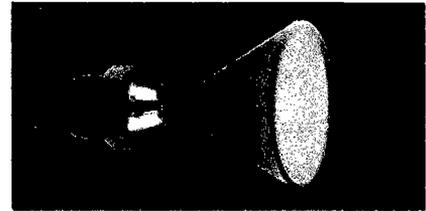


Figura N° 2.31 Tobera de atomizacion



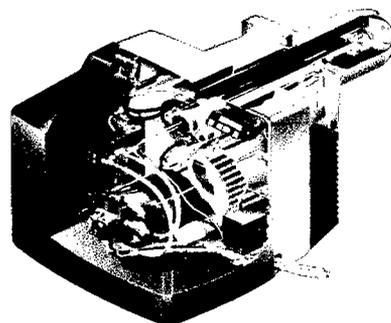
En estos quemadores normalmente el motor eléctrico acciona al mismo tiempo el ventilador y la bomba de petróleo. El control de la inyección del combustible a la tobera se realiza con un controlador de encendido via una electroválvula de seguridad.

Estos quemadores tienen un difusor en acero inoxidable ubicado en la boca del quemador cuya función es asegurar una buena mezcla entre el aire y el combustible pulverizado, adicionalmente evita el retroceso de llama hacia el quemador.

Figura N° 2.32 Difusor

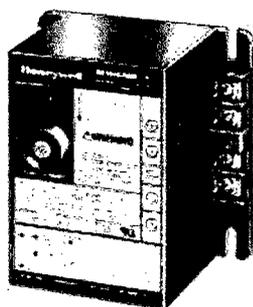


Figura N° 2.33 Quemador diesel 2



Finalmente como elemento de control de llama tiene un controlador de encendido y una fotocelula tipo resistiva que controla la secuencia de encendido y operación segura del quemador, monitoreando la existencia de la llama en todo momento. El tiempo de encendido en promedio es de 30 segundos, tiempo en el cual de realiza el prebarrido y la secuencia de encendido propiamente, de no producirse la llama en el tiempo indicado se bloqueara el quemador (Ver Figura N° 2.34).

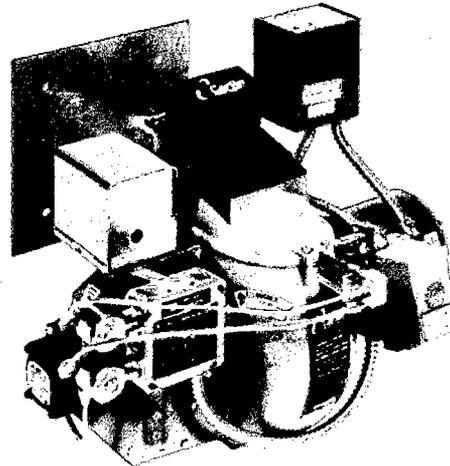
Figura N° 2.34 Controlador de encendido

Figura N° 2.35 Sensor de llama
fotoresistiva

2.4.7.2 QUEMADOR TIPO BAJO/ALTO/BAJO FUEGO

Denominado también quemador low/high/low, son usados normalmente con diesel 2 o similar usando hasta un rango de 1200 kW, estos quemadores son de dos llamas (bajo fuego y alto fuego), arrancan en bajo fuego para luego ir a alto fuego. Constructivamente estos quemadores son muy similares al del tipo on – off; la diferencia entre ambos es que estos últimos tienen dos toberas, dos electroválvulas y un dámper que regula el suministro del aire, su precio es mayor al del tipo on/off.

Figura N° 2.36 Quemador Carlin de dos llamas

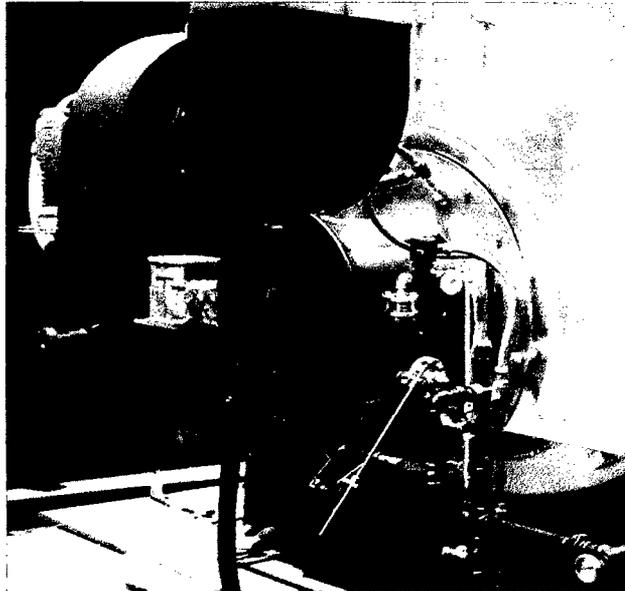


2.4.7.3 QUEMADOR MODULANTE

Es aquel quemador que es capaz de operar con una cantidad indeterminada de llamas dentro del rango entre la llama chica y llama grande. Este tipo de quemador permite generar sólo la cantidad de calor estrictamente necesario, para satisfacer la demanda térmica de la planta o de un determinado proceso. De forma tal que cuando la demanda de calor crece inmediatamente se incrementa el tamaño de llama y viceversa, si la demanda de calor decrece inmediatamente el tamaño de

llama disminuye, encontrándose siempre en equilibrio la demanda y la generación del calor. Su aplicación en calderas es mandatorio a partir de potencias mayores a 1200 kW, principalmente cuando se usan combustibles líquidos tales como el petróleo industrial 6 o el R500, Su precio es mucho mayor que los del tipo Low/High/Low (Ver Figura N° 2.37).

Figura N° 2.37 Quemador modulante, Equipos Térmicos.



2.4.7.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE UN QUEMADOR MODULANTE.

Se tiene los siguientes circuitos:

2.4.7.4.1 LÍNEA DE PETRÓLEO

Conformado por la bomba de engranajes, precalentador mixto, válvula de alivio, válvula dosificadora de petróleo, electroválvula de seguridad, termómetro, manómetros, termostatos y tobera de atomización.

2.4.7.4.2 LÍNEA DE ATOMIZACIÓN Y LIMPIEZA DE TOBERA

Conformada por una compresora rotativa de paletas deslizantes o aire de planta con válvula reductora de presión y electroválvula de control. En calderas, se obtiene una mejor atomización usando vapor saturado; por lo tanto, el aire sólo se usa al comienzo hasta alcanzar la presión de operación de la caldera. La línea de atomización con vapor está conformada por válvula de corte, válvula reductora de presión, separador de humedad, sistema de trampeo de vapor, electroválvula de control y manómetros.

2.4.7.4.3 AIRE DE COMBUSTIÓN

Está conformado por el ventilador dámper de aire y su respectivo motor eléctrico.

2.4.7.4.4 LÍNEA DE ENCENDIDO CON GLP

Está conformado por un balón de 45 kg, válvula reductora de presión, electroválvula de corte, manómetro, transformador de ignición, piloto de encendido.

2.4.7.4.5 SISTEMA DE MODULACIÓN

Conformado por el motor modutrol, dámper de aire, válvula dosificadora de petróleo brazos y varillas de modulación.

2.4.7.4.6 SISTEMA DE SEGURIDAD

Conformado por el programador, fotocelda, interlock de aire de combustión, interlock de fluido atomizante, interlock de temperatura mínima.

2.4.7.5 PARTES DE UN QUEMADOR MODULANTE.

2.4.7.5.1 BOCA O CAÑÓN DEL QUEMADOR

Es el lugar donde se produce la llama, en ella están ensamblados la tobera de atomización, piloto de encendido, difusor y la fotocelda.

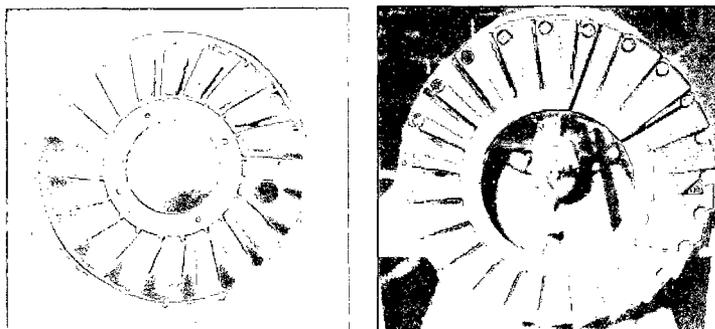
Figura N° 2.39 Cañón del quemador - Equipos Térmicos



2.4.7.5.2 DIFUSOR DE AIRE

Sirve para producir una mezcla óptima entre el aire de combustión y el combustible gasificado, también para retener la llama a fin de evitar su retroceso.

Figura N° 2.40 Difusores de aire



2.4.7.5.3 DÁMPER DE AIRE

Sirve para controlar la dosificación del aire de combustión dentro del rango de modulación, está gobernado por el motor modutrol.

2.4.7.5.4 VÁLVULA DOSIFICADORA DE PETRÓLEO

Es la válvula que controla la cantidad de petróleo a quemar a lo largo de modulación del quemador entre la llama chica y llama grande (Ver Figura N° 2.41).

2.4.7.5.5 ELECTROVÁLVULA PRINCIPAL

Es la válvula de corte que controla la alimentación del combustible a la tobera, según secuencia de arranque y operación del programador, por lo tanto, está comandado por este último (Ver Figura N° 2.42).

Figura N° 2.41 Válvula hauck

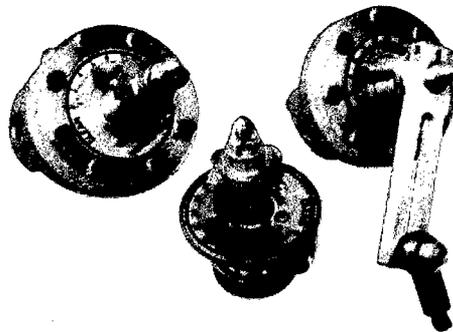
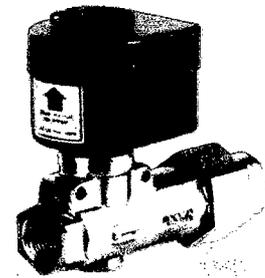


Figura N° 2.42 Electroválvula Asco

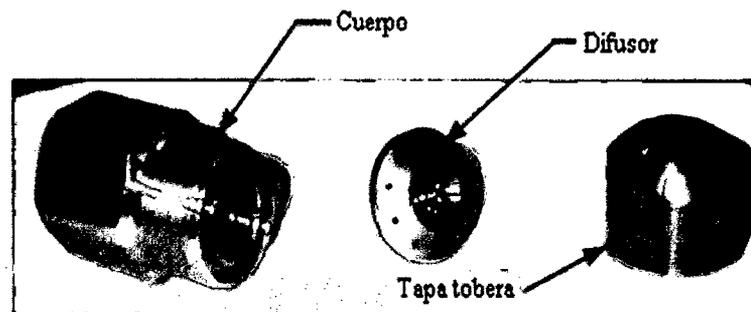


2.4.7.5.6 TOBERA DE ATOMIZACIÓN

Es mucho más robusta que las de combustible liviano, cuya función es pulverizar el combustible en millones de gotas de tamaños menores a 40 micras, para lo cual requiere un fluido atomizante que puede ser aire comprimido o vapor saturado a una presión entre 15 – 30 psi (1,034 – 2,068 bar), adicionalmente requiere

el petróleo presurizado a 15 a 30 psi (1,034 – 2,068 bar), a una temperatura de aproximadamente entre 110 a 120°C. En la Figura N° 2.43 se presenta la Tobera C169 WA.

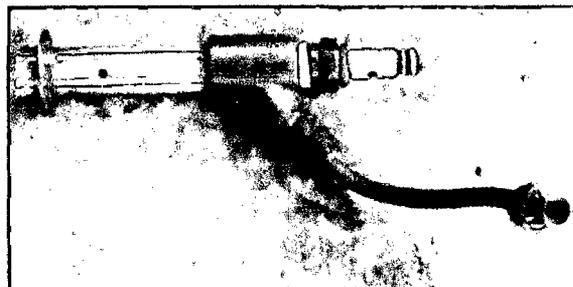
Figura N° 2.43 Tobera Monarch C169 WA



2.4.7.5.7 PILOTO DE ENCENDIDO

Los petróleos industriales no son posibles de encender directamente con una chispa eléctrica a alta tensión, la única forma de producir la llama en estos combustibles es usando una pequeña llama del piloto de encendido, el cual está conformado por el cuerpo del piloto y el electrodo de encendido.

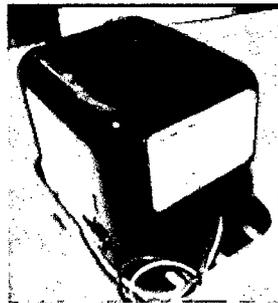
Figura N° 2.44 Piloto de encendido Equipos Térmicos



2.4.7.5.8 TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN

Es un transformador de alta tensión cuya tensión primaria es de 120V y la tensión de salida es de 6.000V de un solo polo.

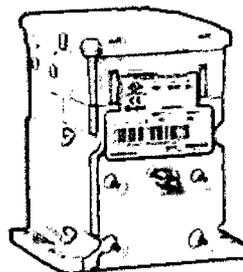
Figura N° 2.45 Transformador de ignición



2.4.7.5.9 MOTOR MODUTROL

Es un aparato motorizado cuya función principal es variar la dosificación del combustible y el aire de combustión dentro del rango de modulación, en respuesta a un cambio de presión o temperatura. Tienen un torque determinado y un giro regulable entre 90° a 160°.

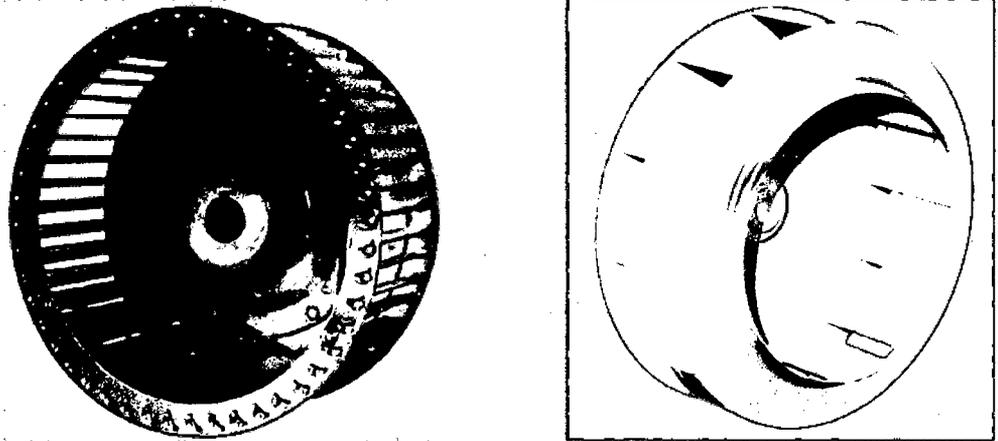
Figura N° 2.46 Modutrol M9184 – Honeywell



2.4.7.5.10 VENTILADOR

Es una máquina hidráulica cuya función es inyectar el aire de combustión a una determinada presión, capaz de vencer la sobrepresión de la cámara de combustión a fin de evacuar los gases generados.

Figura N° 2.47 Rodete de ventiladores centrífugos



2.4.7.5.11 PRESOSTATO DE AIRE

Es un presostato normalmente abierto que cierra sus contactos ante la presencia del aire de combustión, de lo contrario se bloquea la operación del quemador.

Figura N° 2.48 Presostato de aire.



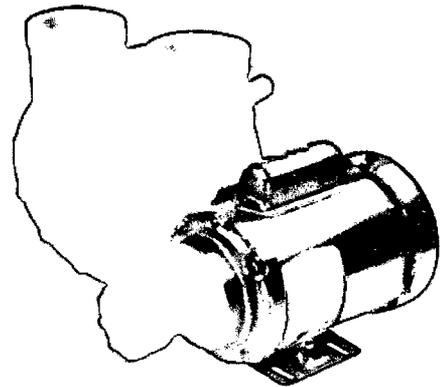
2.4.7.5.12 BOMBA DE PETRÓLEO

Es una bomba de desplazamiento positivo, tipo engranajes, cuya función es inyectar petróleo al quemador a una presión que oscila entre 50 a 80 psi (3,45 a 5,52 bar), con una capacidad del doble que el consumo nominal del quemador.

Figura N° 2.49 Bomba 2AM03 Roper



Figura N° 2.50 Bombas Tuthil



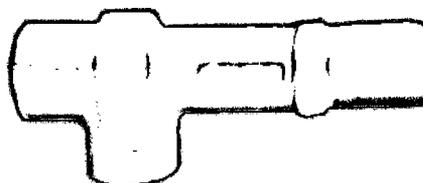
2.4.7.5.13 PRECALENTADOR MIXTO

Es un intercambiador de calor cuya función es elevar la temperatura del petróleo entre 110 a 120°C para su adecuada atomización; está conformado por un casco tubular, serpentín de vapor tipo vayoneta y una resistencia eléctrica del tipo tubular, este último sólo opera cuando no se dispone de vapor.

2.4.7.5.14 VÁLVULA FLULFLO.

Es una válvula de alivio que tiene doble función de regular la presión del petróleo antes de la válvula dosificadora y además de recircular parte del petróleo caliente al tanque diario.

Figura N° 2.51 Válvula Flulflo.



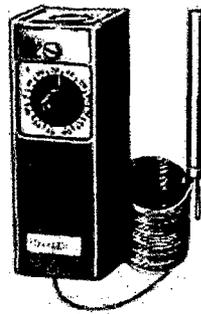
2.4.7.5.15 TANQUE DIARIO

Este equipo no es parte del quemador, pero su adecuado dimensionamiento y operación son vitales para una correcta combustión de los petróleos industriales, esta conformado por un casco cilíndrico, serpentín de calentamiento de vapor tipo vayoneta, resistencia eléctrica, controles de nivel y temperatura. Entre sus principales funciones podemos mencionar: Calentamiento previo del petróleo hasta 80°C para un arranque rápido de los quemadores sin disponer de vapor, almacenamiento del petróleo caliente sólo para una operación de 30 minutos de los quemadores instalados, recepción de la recirculación del petróleo caliente no utilizado en el quemador y la eliminación de gases y vapores de agua generados en el precalentador del quemador.

2.4.7.5.16 TERMOSTATO

Es el accesorio que permite el control de la temperatura de calentamiento de petróleo para su correcta atomización, normalmente está seteado entre 110 a 120°C.

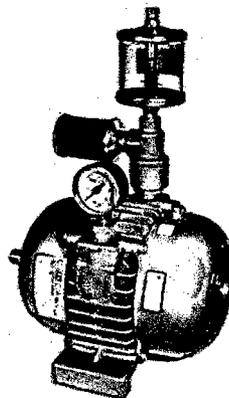
Figura N° 2.52 Termostato.



2.4.7.5.17 COMPRESORA DE ATOMIZACIÓN

Es el equipo que genera aire comprimido a baja presión entre 15 a 20 psi (1,03 a 1,38 bar) y que alimentando a la tobera de forma simultánea con el petróleo caliente permite la atomización de este último. El aire comprimido también sirve para la limpieza automática de la tobera después de cada parada del quemador. Esta compresora puede ser reemplazada por un sistema que usa el aire comprimido de la planta más una válvula de corte, filtro, válvula reductora de presión, electroválvula y válvula check. En calderas de vapor siempre es recomendable el uso del vapor saturado para la atomización en vez del aire comprimido de forma tal que este último sólo se usa en el arranque hasta disponer de vapor. Para lo cual se instala una línea paralela de vapor saturado que está conformada por una válvula de corte, filtro tipo Y, válvula reductora de presión, separador de humedad, electroválvula de vapor, y una válvula check y sistema de trampeo de vapor.

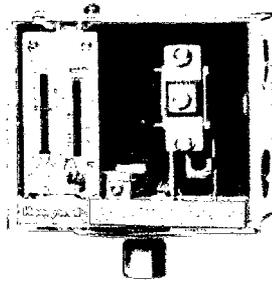
Figura N° 2.53. Compresora de Atomización Gast



2.4.7.5.18 PRESOSTATO DE ATOMIZACIÓN.

Es un presostato normalmente abierto que cierra sus contactos ante la presencia del fluido atomizante, de lo contrario se bloquea la operación del quemador.

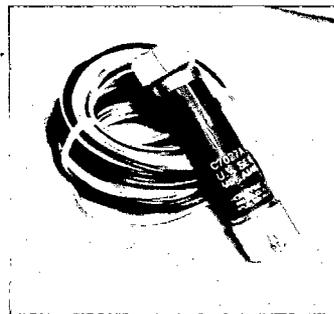
Figura N° 2.54 Presostato de atomización – Honeywell



2.4.7.5.19 FOTOCELDA

Es el instrumento que censa la presencia de llama en todo instante de la secuencia de arranque y operación del quemador y transmite una señal eléctrica al programador indicando la calidad de la misma. Ante una eventual falla deja de transmitir la señal eléctrica y el programador se bloquea apagando el quemador.

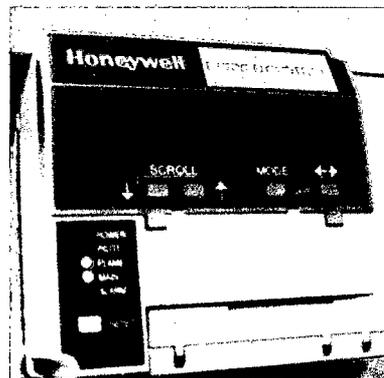
Figura N° 2.55 Fotocelda C7027 a Honeywell



2.4.7.5.20 PROGRAMADOR

Es el instrumento de control más importante, ya que gobierna toda la operación de la caldera. La principal función del programador es realizar la secuencia de arranque y vigilar permanentemente la operación correcta del quemador, normalmente está instalado dentro del tablero eléctrico.

Figura N° 2.56 Programador RM7840L – Honeywell



2.4.8 QUEMADOR PARA COMBUSTIBLE GASEOSO

Al igual que en los quemadores de combustibles líquidos sólo nos dedicaremos al estudio de los quemadores de difusión (con formación de llama en boca), la gran diferencia entre los quemadores de combustibles líquidos y gaseosos está en lo relacionado al circuito de combustible, sin embargo, el arranque y operación prácticamente son iguales, desde el punto de vista constructivo y de componentes son semejantes, existen ciertas diferencias que se mencionan a continuación para los tres tipos de quemadores:

- a. Quemadores de una etapa (on – off.)
- b. Quemadores bajo/alto/bajo fuego.
- c. Quemadores modulantes.

2.4.8.1 QUEMADORES DE UNA ETAPA

Son de una sola llama, cuyo encendido es por chispa eléctrica producidos por un transformador de alta tensión (6.000V) y un electrodo de encendido colocados a 3 mm del difusor o del distribuidor de gas, se usan para pequeñas potencias normalmente hasta 350 kW, eventualmente se pueden usar hasta 6000 kW, pero su arranque es un tanto ruidoso acompañado de pequeños retrocesos de llama.

Figura N° 2.57 Quemador Wayne

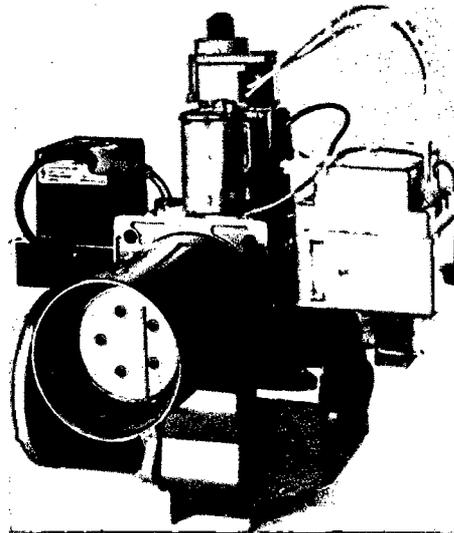


Figura N° 2.58 Quemador Eqa

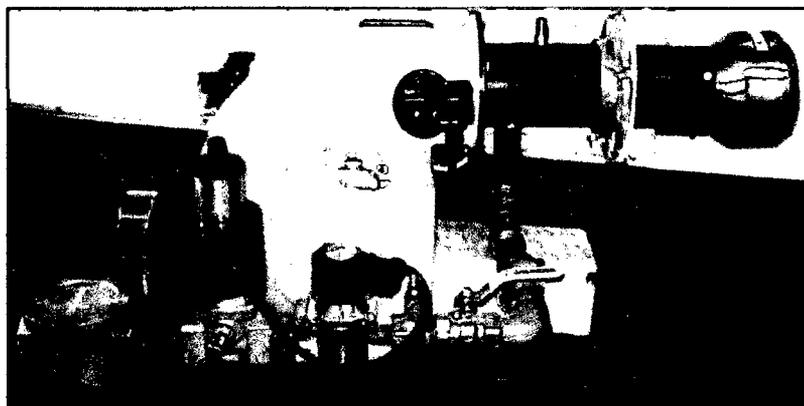
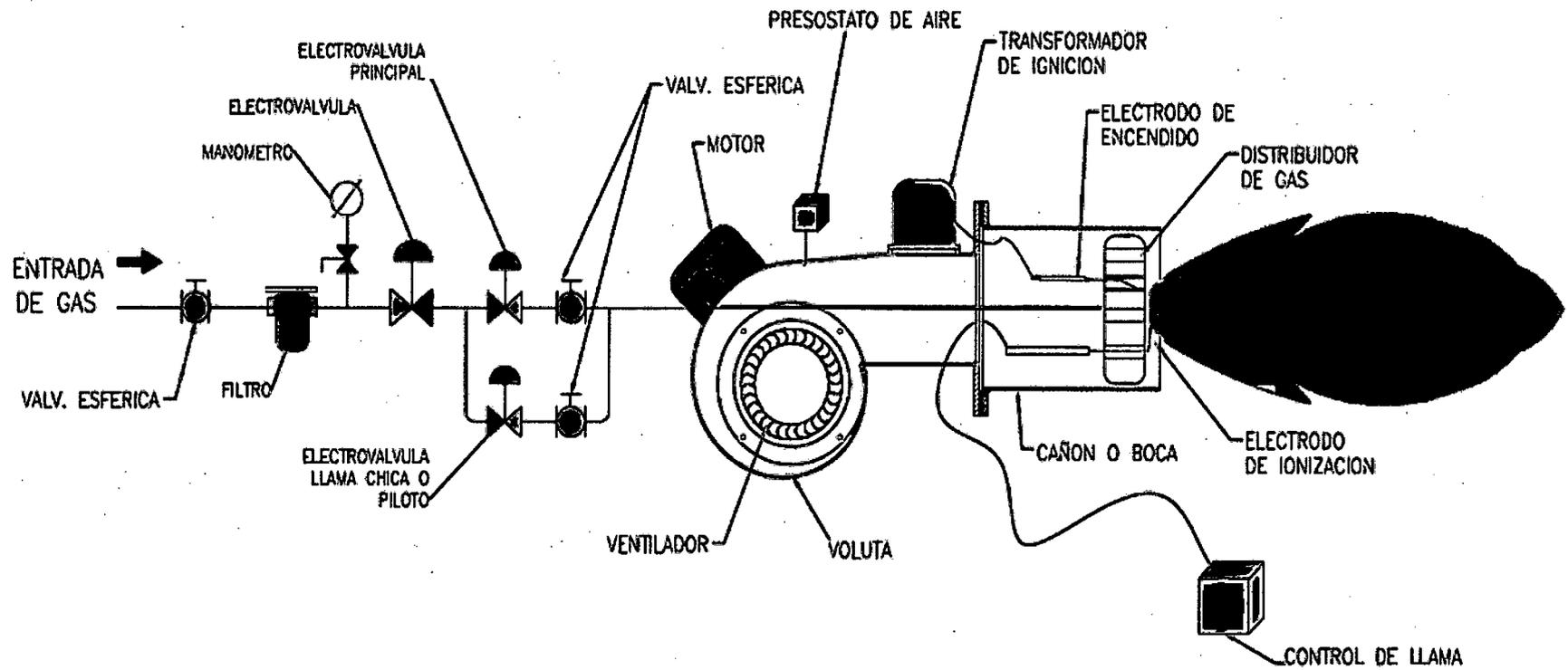


Figura N° 2.59 Diagrama de flujo de un quemador de una etapa



El quemador cuenta con un motor eléctrico que acciona el ventilador del aire de combustión; el suministro del combustible se realiza energizando un juego de electroválvulas llamado tren o ramal de válvulas. El mismo está controlado por un programador de encendido.

Figura N° 2.60 Controlador de encendido



También tienen un difusor de acero inoxidable ubicado en la boca del quemador cuya función es asegurar una buena mezcla entre el aire y el combustible gaseoso, adicionalmente evita el retroceso de llama.

Figura N° 2.61 Difusor

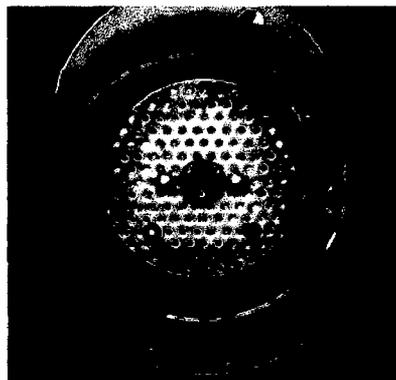


Figura N° 2.62 Electrodo de ionización, difusor e inyector de gas



Como elemento de control de llama tiene un programador de encendido y un sensor de llama (electrodo de ionización), que controla la secuencia de encendido y operación segura del quemador. Donde el tiempo de encendido en promedio dura entre 45 a 90 segundos, el tiempo de prepurga varía entre 24 a 60 s., y el tiempo de seguridad es de 3 a 5 segundos.

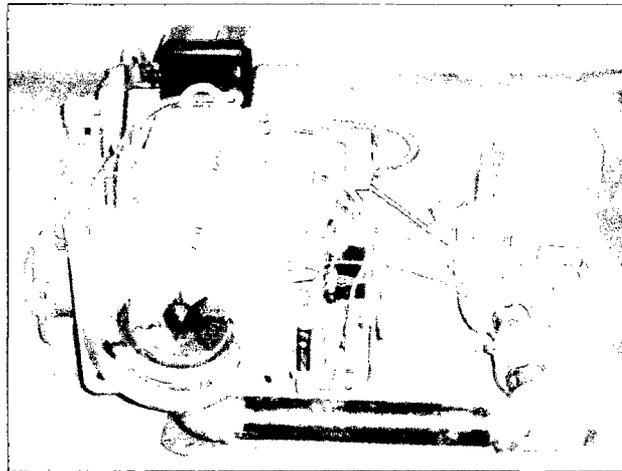
Para generar la llama se requiere la presencia de la mezcla del combustible gaseoso con el aire en la proporción correcta, una vez producida la chispa, en los siguientes segundos del tiempo de seguridad deberá producirse la llama principal, el cual será detectado por el electrodo de ionización y el quemador quedará funcionando de forma segura, de no ser así, el quemador se bloquea.

2.4.8.2 QUEMADOR TIPO BAJO/ALTO/BAJO FUEGO

Son de dos llamas (bajo y alto fuego), su rango de aplicación en calderas es hasta una potencia de 1750 kW. El encendido es en bajo fuego para luego ir progresivamente a alto fuego, una vez satisfecha la demanda de calor en alto fuego regresa a bajo fuego. Constructivamente estos quemadores son muy similares al de una etapa y usan los mismos controles, con la diferencia que tienen un Servomotor que controla al mismo tiempo un dámper que regula el suministro del aire y una

válvula reguladora que controla del caudal del gas. Obviamente su precio para una misma potencia es mayor que el de una etapa. Entre sus ventajas podemos mencionar su operación más silenciosa y generación de calor acorde a la demanda.

Figura N° 2.63 Quemador Power flame tipo bajo/alto/bajo fuego



2.4.8.3 QUEMADOR MODULANTE

Este quemador, en cuanto a su principio de funcionamiento, es igual al de los combustibles líquidos modulantes, existiendo algunas diferencias constructivas.

Figura N° 2.64 Quemador modulante Saacke



2.4.8.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE UN QUEMADOR MODULANTE

En la Figura N° 2.65 se presenta el diagrama de flujo del quemador modulante, el cual está conformado por los siguientes circuitos:

2.4.8.4.1 AIRE DE COMBUSTIÓN

Está conformado por el ventilador, dámper de aire y su respectivo motor eléctrico.

2.4.8.4.2 LÍNEA DE ENCENDIDO

Está conformado por una válvula reductora de presión, dos electroválvulas de corte, manómetro, transformador de ignición y piloto de encendido.

2.4.8.4.3 SISTEMA DE MODULACIÓN

Conformado por el motor modutrol, dámper de aire, válvula dosificadora de gas, brazos y varillas de modulación.

2.4.8.4.4 SISTEMA DE SEGURIDAD

Conformado por el programador, electrodo de ionización, interlock de aire de combustión, interruptores de baja y alta presión de gas.

2.4.8.4.5 LÍNEA DE GAS

Conformado por dos electroválvulas de corte, filtro, manómetros, presostatos, válvula de bloqueo, que en conjunto forman el tren o ramal de válvulas y válvula dosificadora de gas.

2.4.8.5 PARTES DE UN QUEMADOR MODULANTE

2.4.8.5.1 BOCA O CAÑÓN DEL QUEMADOR

Es el lugar donde se produce la llama, está formado por: Cuerpo del cañón, piloto de encendido, difusor y el electrodo de ionización (Ver Figura N° 2.66).

2.4.8.5.2 DIFUSOR DE AIRE O ANILLO DE CONTENCIÓN

Sirve para producir una mezcla óptima entre el aire de combustión y el gas debido al incremento de la turbulencia, proporcionando un frente de llama estable, quedando la llama confinada al anillo de contención con lo que se evita el retroceso de la llama (Ver Figura N° 2.67).

Figura N° 2.66 Cañón del quemador Weishaupt

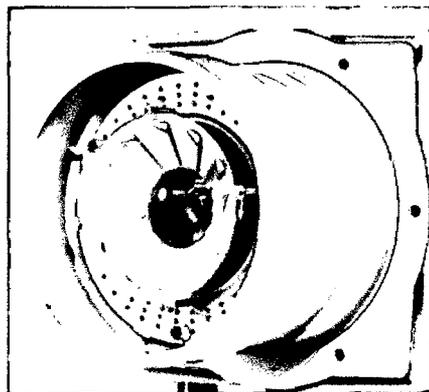
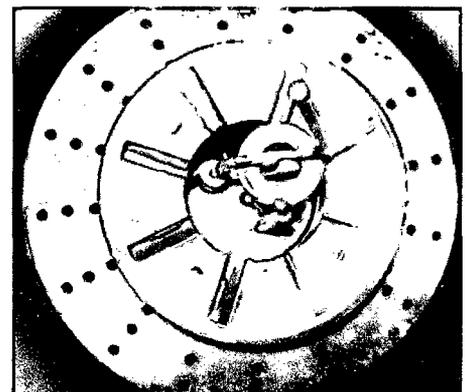


Figura N° 2.67 Difusor de Aire quemador Autoquem



2.4.8.5.3 DÁMPER DE AIRE

Sirve para controlar la dosificación del aire de combustión dentro del rango de modulación, está controlado por el motor modutrol.

2.4.8.5.4 VÁLVULA CONTROLADORA DEL CAUDAL DE GAS

Es la válvula que controla la cantidad de gas a quemar a lo largo de modulación del quemador entre la llama chica y la llama grande.

Figura N° 2.68 Válvula controladora de caudal de gas Eqa



2.4.8.5.5 TREN O RAMAL DE DE VÁLVULAS

Es el juego de válvulas de corte automático que controla la alimentación del combustible al quemador, según la secuencia de arranque y funcionamiento del programador.

Figura N° 2.69 Tren o ramal de válvulas Honeywell



2.4.8.5.6 PILOTO DE ENCENDIDO

A pesar de que con una chispa eléctrica de alta tensión, es posible producir la llama en los combustibles gaseosos, el uso de una llama piloto de encendido permite una arranque suave y seguro de la llama principal, evitando fogonazos y posibles explosiones. Constructivamente, son iguales a los pilotos de quemadores de combustibles líquidos.

2.4.8.5.7 ELECTRODO DE IONIZACIÓN

La detección de llama se realiza mediante un sensor que recibe el nombre de electrodo de ionización. Este sensor está constituido por un elemento conductor, generalmente una varilla de Kanthal de acero inoxidable, que es el electrodo propiamente dicho y un cuerpo de porcelana que contiene a la varilla y le sirve de soporte. Cumple la función de enviar al programador una señal cada vez que se genera una llama en sus inmediaciones. Cuando hay llama, por efecto de la alta

temperatura, los gases de combustión resultan ionizantes; es decir, que permiten el paso de una corriente eléctrica entre el electrodo, la llama y la carcasa del piloto o del quemador (para quemadores sin piloto). El programador envía al electrodo una corriente alterna, si no hay llama la corriente se detiene en el electrodo; pero si hubiera llama, por efecto de la ionización circula una corriente hacia la masa que resulta continua y que retorna al control electrónico por el terminal de masa.

2.4.8.5.8 FOTOCELDA ULTRA VIOLETA (UV)

La fotocélula ultravioleta es en realidad una lámpara de descarga, en la cual la descarga se produce sólo cuando sobre la lámpara inciden los rayos ultravioletas emitidos por la llama. En la zona de combustión primaria de la llama de combustibles gaseosos se genera una débil emisión de radiación ultravioleta (UV), pero suficiente para ser detectado mediante la fotocélula ultravioleta. En general, es el único sistema fiable para la detección de la llama de los combustibles gaseosos, para su utilización en hogares calientes, con cualquier tipo de combustible. Es el instrumento que sensa la presencia de llama en todo instante de la secuencia de arranque y funcionamiento del quemador transmitiendo una señal eléctrica al programador indicando la calidad y existencia de la misma. Ante una eventual falla deja de transmitir la señal eléctrica y el programador se bloquea apagando el quemador.

El resto de las partes tales como el transformador de ignición, motor modutrol, ventilador, presostatos de aire, fotocelda, programador y tablero de control son los mismos que el correspondiente a los quemadores de combustibles líquidos.

2.4.8.6 QUEMADOR MIXTO

Los quemadores mixtos son aquellos que pueden quemar de forma simultánea o alternativa dos combustibles, sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas. Para el presente trabajo, el quemador convertido operará de forma alternativa con gas o petróleo industrial N° 6.

2.4.8.7 SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO

Para nuestro caso toda la secuencia de arranque y funcionamiento está controlado por el programador o controlador electrónico serie RM7840L y la fotocelda ultravioleta C7027A de la marca Honeywell.

a. Inicio

Se energiza el sistema de mando, el programador detecta las variaciones de tensión y frecuencia que deben estar dentro del rango aceptable.

b. Espera (standby)

Está listo para iniciar la secuencia de arranque, monitorea las señales de bajo nivel de agua, exceso o defecto de presión del gas, presión de parada y arranque de la caldera. Si los valores no están dentro de los rangos preestablecidos se bloquea el programador.

c. Prepurga

Se inyecta aire a la caldera a toda capacidad, por un determinado tiempo (30 s), sólo prende el ventilador del quemador y el switch de aire debe cerrarse (en este periodo la fotocelda no debe detectar ningún tipo de señal de llama de lo contrario se bloquea el programador).

d. Pruebas de ignición

Tiene dos etapas (se producen la llama piloto y llama principal):

- Encendido de llama piloto de gas: Se produce la chispa eléctrica vía el transformador de encendido, enseguida se energizan las electroválvulas del piloto dando pase al ingreso del gas produciéndose la llama piloto. (Si no se produce la llama dentro de un tiempo determinado se bloquea el programador).
- Encendido de llama principal: Una vez producido la llama piloto el cual es detectado por la fotocelda se da pase a la apertura de la válvulas principales de gas dando pase del gas produciéndose la llama principal (si no se produce la llama principal dentro de un tiempo determinado se bloquea el programador).

e. Operación (run)

Una vez ocurrido el período de estabilización de la llama principal, la llama piloto se apaga y el quemador queda prendido sólo con la llama principal hasta que la presión de vapor en la caldera alcance la presión máxima de trabajo.

Durante la operación, una serie de sensores de seguridad (control de nivel de agua, sensor de presión, sensor de llama, etc.) verifican en todo momento que los parámetros respectivos se mantengan en el rango adecuado. Si cualquiera de los parámetros se sale de su rango inmediatamente es detectado por el sensor que le corresponde y el quemador se apaga, llegando a ser necesario, en algunos casos, la presencia del operador para volver a ponerlo en marcha.

El tamaño de llama es controlado por el resostato L91B vía el motor modutrol, los mismos están monitoreados por el programador. Con esto se logra el

efecto de modulación en el quemador de manera que la llama se adecua a la demanda de vapor de la planta, variando su tamaño según sea el caso.

f. Postpurga

Cuando el presostato de arranque-parada detecta la presión máxima de trabajo, inmediatamente manda una señal al programador, el cual desenergiza las electroválvulas principales de alimentación de combustible, con lo cual el quemador se apaga.

Luego se da inicio a la post-purga o barrido final de los gases remanentes en el hogar. Sólo está prendido el ventilador por un tiempo determinado, inyectando aire fresco a la caldera. Terminada la postpurga se apaga el motor del ventilador.

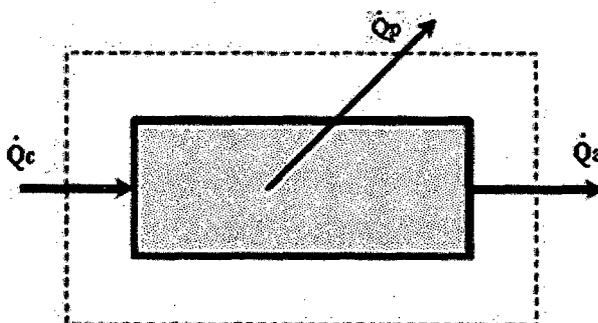
El programador queda en espera (stand-by) hasta que se consuma el vapor almacenado en la caldera y baje la presión de vapor para iniciar nuevamente la secuencia de arranque.

2.5 EFICIENCIA DE UNA CALDERA

Uno de los parámetros más importantes en el diseño y operación de los equipos de combustión y específicamente en las calderas es la eficiencia debido a su impacto directo en los costos de operación.

En general, los sistemas de equipos de combustión pueden representarse según el esquema de la Figura N° 2.70.

Figura N° 2.70 Esquema térmico de un equipo de combustión



Donde:

\dot{Q}_a : Calor absorbido o calor útil

\dot{Q}_c : Calor de combustible o suministrado

\dot{Q}_p : Calor de pérdidas

\dot{Q}_q : Calor de combustión

\dot{Q}_g : Calor perdido en los gases de chimenea

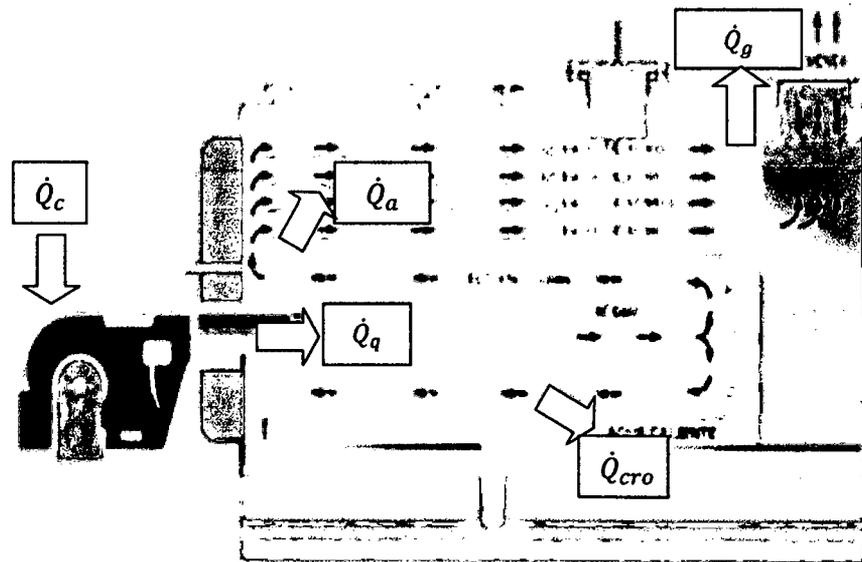
\dot{Q}_{cro} : Calor perdido por conducción, radiación y otros.

\dot{Q}_i : Calor perdido por inquemados sólidos y gaseosos.

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_g + \dot{Q}_{cro} \quad [2.53]$$

En la Figura N° 2.71 se representa el diagrama de flujo de calor de una caldera.

Figura N° 2.71 Flujo de calor en una caldera



Considerando los flujos de calor que se presentan en una caldera, podríamos definir tres tipos de eficiencia:

- Eficiencia de combustión.
- Eficiencia térmica.
- Eficiencia de la caldera (eficiencia neta de la caldera).

2.5.1 EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN (η_c)⁷³

Es la efectividad exclusiva del quemador y está relacionada con su habilidad para quemar totalmente el combustible. La caldera propiamente tiene poca relación sobre la eficiencia de la combustión, salvo si está mal dimensionado el hogar, es decir, el término eficiencia de combustión describe la parte de la energía total que

⁷³ Equipos Industriales, 1997, Manual Selmecc de Calderas Industriales, 1997, México. p. 85.

está disponible en la cámara de combustión después de la combustión; está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_q}{\dot{Q}_c} \times 100 = \frac{\dot{Q}_c - \dot{Q}_i}{\dot{Q}_c} \times 100 \quad (2.54)$$

El calor del combustible (\dot{Q}_c) se obtiene multiplicando la masa del combustible por su poder calorífico.

2.5.2 EFICIENCIA TÉRMICA (η_T)

Es la efectividad de la transmisión de calor en un cambiador de calor y no toma en cuenta las pérdidas por radiación, convección ni purgas de fondo. Normalmente la eficiencia térmica se lee directamente con el analizador de gases⁷⁴.

2.5.3 EFICIENCIA DE LA CALDERA (η)

Conocida también como eficiencia neta de la caldera, es la relación entre el calor aprovechado por el fluido calorportante (agua, vapor, fluido térmico) y el calor que suministrará el combustible al mismo en una hora, se obtiene a través de la ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_c} \times 100 \quad (2.55)$$

El calor suministrado \dot{Q}_c está en razón directa del poder calorífico y ésta, a su vez, puede tomar el valor del poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI). Al respecto hay dos tendencias, la tendencia usada en Europa, que miden la eficiencia en base al PCI y la tendencia usada en Estados Unidos de América que mide la eficiencia en base al PCS.

⁷⁴ Equipos Industriales, 1997, *Manual Selmech de Calderas Industriales*, 1997, México. p. 85.

Como el valor del PCS es mayor al valor del PCI la eficiencia medida en base al PCI será mayor al medido con el PCS, estableciéndose las siguientes relaciones:

η_{pcs} = Eficiencia de la caldera en base a PCI

η_{pci} = Eficiencia de la caldera en base a PCI

$$\eta_{\text{pcs}} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{m}_f \cdot \text{PCS}} \rightarrow \dot{Q}_a = \eta_{\text{pcs}} \cdot \dot{m}_f \cdot \text{PCS} \quad (2.56)$$

$$\eta_{\text{pci}} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{m}_f \cdot \text{PCI}} \rightarrow \dot{Q}_a = \eta_{\text{pci}} \cdot \dot{m}_f \cdot \text{PCI} \quad (2.57)$$

Igualando las ecuaciones (2.56) y (2.57)⁷⁵:

$$\eta_{\text{pcs}} \cdot \text{PCS} = \eta_{\text{pci}} \cdot \text{PCI} \quad (2.58)$$

Por lo tanto conocido el valor de la eficiencia en base al PCS, es factible calcular la eficiencia en base al PCI o viceversa.

2.5.4 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA

A partir del balance de energía es posible calcular la eficiencia térmica a través de dos métodos:

- a. Método Directo
- b. Método Indirecto

⁷⁵ Ganapathy, V 2003, *Industrial Boilers and heat Recovery Steam Generators Design Applications and calculations*, Editorial: Marcel Dekker Inc, Texas, USA, p. 269.

2.5.4.1 MÉTODO DIRECTO

En el Método Directo la eficiencia de una caldera se define como la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor, y la energía suministrada por el combustible. Se expresa normalmente en forma de porcentaje:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_c} \times 100 \quad (2.59)$$

2.5.4.2 MÉTODO INDIRECTO

Consiste en medir las pérdidas que se producen y, a partir de ellas, obtener la eficiencia.

$$\eta = \left(1 - \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_c}\right) \times 100 \quad (2.60)$$

Como sabemos de la ecuación (2.53):

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_g + \dot{Q}_{cro}$$

\dot{Q}_g , es la suma de los calores perdidos en los gases secos, calor perdido por la entalpía del vapor de agua en los gases y el calor perdido por inquemados sólidos y gaseosos.

Además \dot{Q}_{cro} es el calor perdido por conducción, radiación y otros, en general, se puede estimar dentro del rango: 1-3%.

También el \dot{Q}_g y \dot{Q}_{cro} se podrían calcular usando las fórmulas de la Norma Técnica Peruana NTP 350.300-2002. En la Tabla N° 2.25 se presenta los valores máximos de CO₂ permitidos en los gases de combustión.

Tabla N° 2.25 Valores Típicos de $[\text{CO}_2]_{\text{MAX}}$

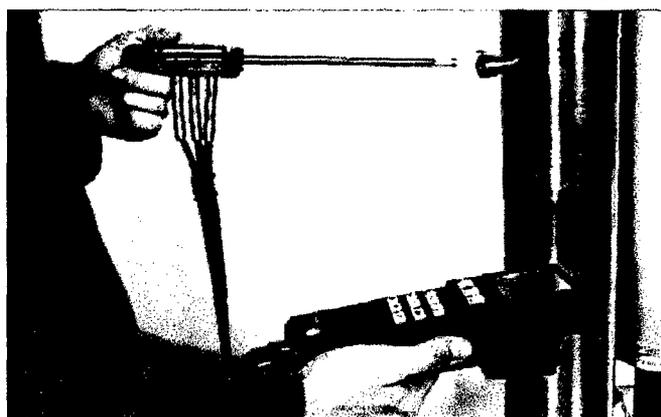
Ítem	Combustible	$[\text{CO}_2]_{\text{MAX}}$
1	Residual	15,8
2	Destilados	15,5
3	GLP	13,8
4	Gas natural	11,9

Fuente: Calderas Industriales, Procedimiento para determinación de la eficiencia térmica de calderas industriales, NTP 350.300.2002

En el presente trabajo se usará la medición indirecta para evaluar \dot{Q}_g , tanto antes y después de la conversión del quemador. El *Manual Selmec de Calderas, Selmec Equipos Industriales, México, 1997*, indica que el valor de \dot{Q}_{cro} puede ser de 1% a 3%, para un cálculo conservativo y por razones logísticas el valor \dot{Q}_{cro} lo tomaremos como 2,5% en promedio, para ambos casos.

El equipo medidor de gases es marca TESTO, modelo T325XL mide de forma directa el porcentaje de pérdidas por gases de chimenea (\dot{Q}_g) en base al poder calorífico superior y el modelo 346-1 que mide la eficiencia en base al poder calorífico inferior.

Figura N° 2.72. Determinación de las pérdidas por humos



Fuente: Guía de combustión de gases TESTO

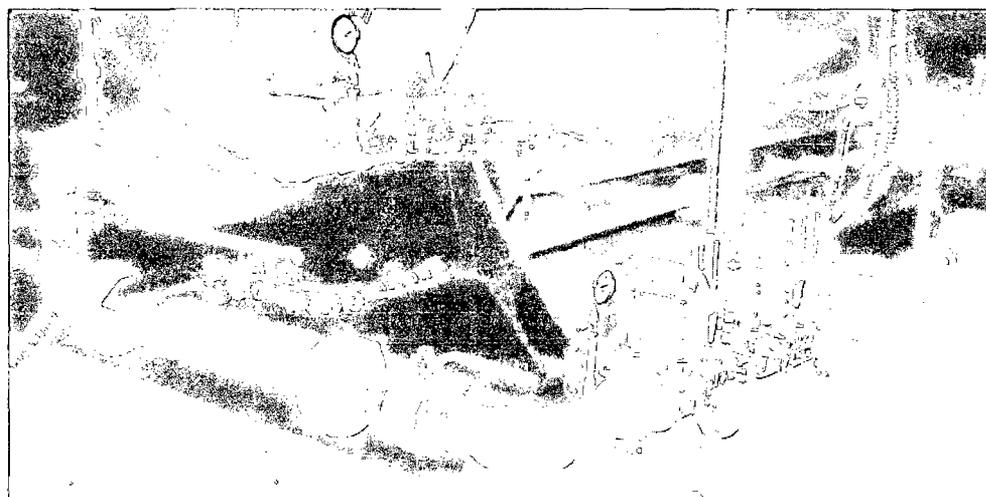
2.6 TREN DE VÁLVULAS DE GAS

En el presente trabajo, el estudio del tren de válvulas es uno de los capítulos más relevantes, por tratarse de un componente vital para el funcionamiento óptimo y seguro del quemador convertido a gas natural. Por lo tanto, será necesario describir sus funciones, partes, recomendaciones normativas y criterios para su dimensionamiento.

2.6.1 DEFINICIÓN

Conjunto de aparatos y elementos instalados con el propósito de alimentar o cortar el combustible al quemador de forma automática y segura según la secuencia de funcionamiento del quemador, gobernado por el controlador electrónico (programador).

Figura N° 2.73 Tren de válvulas de combustión Equipos Térmicos



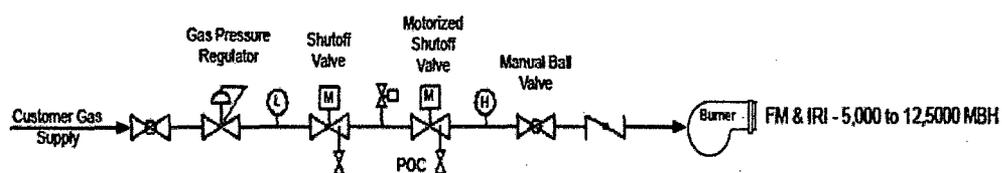
2.6.2 NORMAS

Para asegurar una operación segura del quemador el tren de válvulas dimensionada deberá cumplir con cualquiera de las normas internaciones. Entre las normas más usadas podemos mencionar los siguientes:

- a. Normas argentinas (NAG): La NAG 201 indica las disposiciones, normas y recomendaciones para uso de gas natural en instalaciones industriales.
- b. Normas Americanas: Factory mutual systems (FM), Underwriters Laboratoirs Inc. (UL 795), Industrial Risk Insurers (IRI), ASME CSD-1 entre otros.
- c. Normas Europeas: La UNE – EN 676 Quemadores automáticos de aire forzado que utilizan combustibles gaseosos.

Para el presente trabajo usaremos la Norma Argentina NAG 201, que es muy similar a la FM e IRI, en la Figura N° 2.74 se presenta un esquema de disposición de Tren de válvulas según las normas FM e IRI.

Figura N° 2.74 Esquema de Tren de válvulas



2.6.3 CONFIGURACIONES DEL TREN DE VÁLVULAS

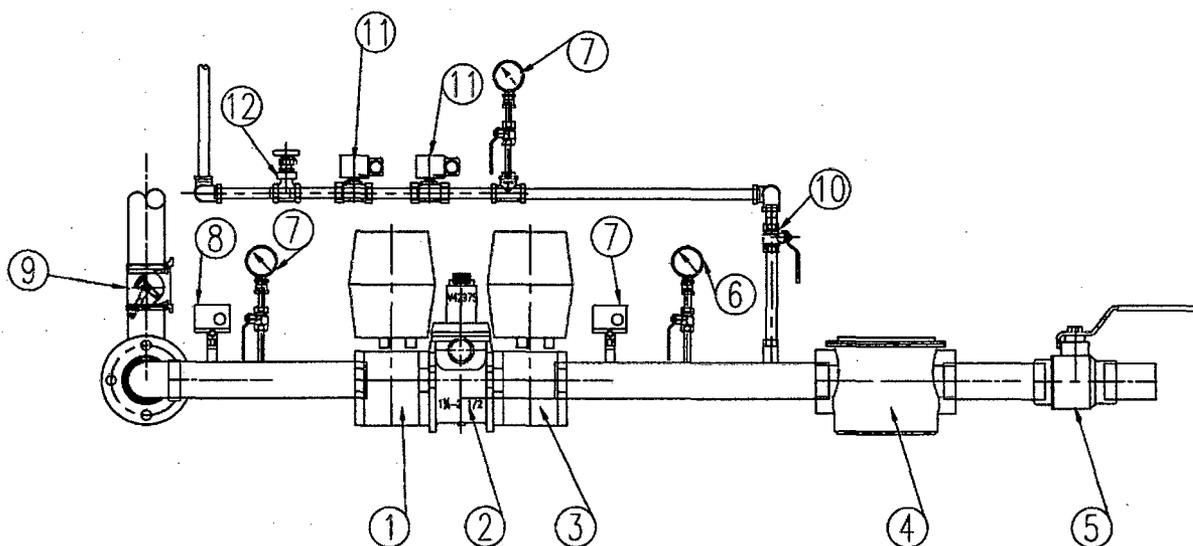
Según el rango de potencias de los quemadores, la configuración del tren de válvulas cambia. A continuación se presenta las configuraciones correspondientes a la norma NAG 201:

- a. Para carga térmica hasta 360 kW una válvula automática de cierre. Tiempo máximo de cierre: 5 s.
- b. Para carga térmica mayor que 360 kW y hasta 720 kW, dos válvulas automáticas de cierre en serie, o una con microcontacto de prueba de válvula cerrada. Tiempo de cierre: 1 s.
- c. Para carga térmica mayor que 720 kW y hasta 1800 kW, dos válvulas automáticas de cierre en serie, una de ellas con microcontacto de prueba de válvula cerrada. Tiempo máximo de cierre 1 segundo y tiempo mínimo de apertura para la válvula automática de cierre de aguas arriba del sistema: 10 segundos
- d. Para carga térmica mayor que 1800 kW y hasta 12000 kW, dos válvulas automáticas de cierre en serie y una válvula de seguridad de venteo entre ambas. Tiempo máximo de cierre: 1 segundo. Tiempo mínimo de apertura para ambas válvulas automáticas de cierre del sistema: 10 segundos.
- e. Para carga térmica mayor que 12000 kW dos válvulas automáticas de cierre en serie, una de ellas con microcontacto de prueba de válvula cerrada, y una válvula de seguridad de venteo entre ambas. Tiempo máximo de cierre: 1 segundo y tiempo mínimo de apertura: 20 segundos para ambas válvulas automáticas de cierre.

2.6.3.1 COMPONENTES DEL TREN DE VÁLVULAS

En la Figura N° 2.75 se presentan los componentes del Tren de Válvulas según la norma NAG201.

Figura N° 2.75 Componentes del Tren de Válvulas



Leyenda

Ítem	Descripción
1	Electroválvulas de seguridad principal
2	Electroválvula de venteo
3	Electroválvula de seguridad principal
4	Filtro con malla de 50 micras
5	Válvula de corte
6	Manómetro
7	Interruptor de presión de baja
8	Interruptor de presión de alta
9	Válvula mariposa
10	Válvula de corte
11	Electroválvulas de piloto

2.6.4 DIMENSIONAMIENTO

El cálculo y dimensionamiento del ramal de gas se realizará usando las fórmulas de la norma técnica peruana NTP 111.010 y catálogos de fabricantes. Para lo cual será necesario determinar el caudal nominal de gas que deberá manejar el tren, se seleccionará un diámetro aproximado teniendo en cuenta lo siguiente:

- a. La velocidad no supere los 40m/s.
- b. La máxima caída de presión entre dos etapas de regulación es de 50%.

2.6.4.1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN

$$v = \frac{365,35\dot{V}}{d^2 p} \quad (2.61)$$

Donde:

p : Presión de cálculo absoluta en kg/cm^2 .

\dot{V} : Flujo volumétrico (caudal) en m^3/h (condiciones estándar).

d : Diámetro interior en mm.

v : Velocidad lineal en m/s.

2.6.4.2 CÁLCULO DE DIÁMETRO DE LAS TUBERÍAS

$$d = \frac{(365,35\dot{V})^{1/2}}{(vp)^{1/2}} \quad (2.62)$$

Donde:

p : Presión de cálculo absoluta en kg/cm^2 .

\dot{V} : Flujo volumétrico (caudal) en m^3/h (condiciones estándar).

d : Diámetro interior en mm.

v : Velocidad lineal en m/s.

2.6.4.3 CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

Se debe considerar la fórmula de Renouard simplificada para presiones de 0 a 4bar y válida para $\dot{V}/d < 150$

$$p_1^2 - p_2^2 = 486.000 \times \rho_s \times L \times \frac{\dot{V}^{1.82}}{d^{4.82}} \quad (2.63)$$

Donde:

p_1 y p_2 : Presión absoluta, en ambos extremos del tramo en kg/cm^2

ρ_s : Densidad relativa del gas

L: Longitud del tramo en km, incluyendo la longitud equivalente de los accesorios que la componen.

\dot{V} : Flujo volumétrico (caudal) en m^3/h (condiciones estándar)

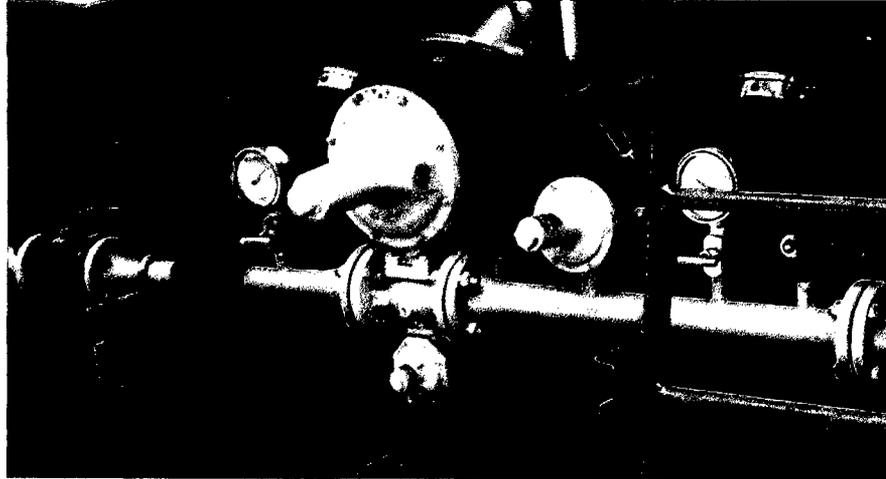
d: Diámetro interior en mm

2.7 ESTACIÓN DE REGULACIÓN SECUNDARIA

2.7.1 DEFINICIÓN

La Estación de Regulación Secundaria (ERS) es el conjunto de aparatos y elementos instalados con el propósito de reducir y regular automáticamente la presión del fluido aguas abajo de la Planta de Regulación y Medición Primaria. Su utilización se requiere cuando la presión de trabajo del equipo de combustión o artefacto es inferior a la presión de operación de la instalación interna de gas natural. Su adecuado dimensionamiento e instalación son vitales para una adecuada regulación y puesta en marcha de una caldera o sistema de combustión.

Figura N° 2.76 Estación de Regulación Secundaria



2.7.2 REGULADOR DE PRESIÓN

Aparato que reduce la presión del fluido que recibe y la mantiene constante, independientemente de los caudales que permite pasar y de la variación de presión aguas arriba del mismo, dentro de los rangos admisibles.

2.7.3 PARTES DE UNA ESTACIÓN DE REGULACIÓN SECUNDARIA (ERS)

Las ERS están conformados por los siguientes elementos: válvula de bloqueo de cierre rápido y accionamiento manual, filtro, regulador de presión, manómetros con sus correspondientes válvulas de bloqueo, válvulas de venteo manual aguas abajo del regulador y válvula de venteo manual anterior a la regulación para purga de cañerías en aquellos casos en que, por su distancia desde la planta reguladora principal lo hagan necesario. Los reguladores serán instalados entre elementos que posibiliten su remoción. En la Figura N° 2.77, se presenta el diagrama de flujo de la Estación de Regulación Secundaria.

2.7.4 PARÁMETROS PARA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO

Un adecuado dimensionamiento de la ERS pasa por una adecuada selección de la válvula reguladora de presión, ésta tendrá incorporado una válvula de bloqueo en aquellos casos en que las electroválvulas del tren de válvulas no soporten la presión de operación de la red interna.

2.7.4.1 PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LA VÁLVULA REGULADORA.

Los parámetros para la selección de la Válvula reguladora son:

a. Caudal (expresado en Nm^3/h),

Para calderas pequeñas con quemadores de una sola etapa debe ser el doble de capacidad del consumo nominal del quemador, para calderas equipadas con quemadores tipo alto bajo fuego o modulantes la capacidad debe ser 1,25 a 1,5 del consumo nominal del quemador.

b. Presión de ingreso

Viene a ser la presión de operación de la instalación interna menos las pérdidas hasta el ingreso a la ERS (como máximo será 4bar).

c. La presión de salida

Viene a ser la presión que requiere el sistema de combustión.

d. Presión de bloqueo

La presión de bloqueo, de ser necesario será, de 50 a 65 mbar más que la presión de operación del sistema de combustión, pero menor o igual a la máxima presión de operación de las electroválvulas del tren de válvulas.

e. La sensibilidad de la válvula reguladora

Deberá ser menor al 5% de la presión regulada.

2.7.4.2 DIÁMETRO DE TUBERÍA Y VÁLVULAS DE BLOQUEO

El cálculo del diámetro de la tubería y válvulas de bloqueo se realiza utilizando las formulas de la norma NPT 111.010, para una velocidad de flujo igual o menor a 30m/s, las presión de operación máximo es de 4bar para el caso peruano, por lo tanto, los elementos de la ERS serán de clase 150.

2.7.5 RECOMENDACIONES PARA SU INSTALACIÓN.

Una adecuada instalación garantiza una correcta operación de la ERS, las recomendaciones a considerar son:

- a. Instalar en lugares poco calientes (máx. 50°C) de preferencia a temperaturas ambientales y de fácil acceso.
- b. Los venteos de los reguladores deberán elevarse a los cuatro vientos en una zona segura.
- c. No se admiten "bypass" de regulación manual en las estaciones de regulación secundaria.

CAPÍTULO III

CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE APARATOS

3.1 INTRODUCCIÓN

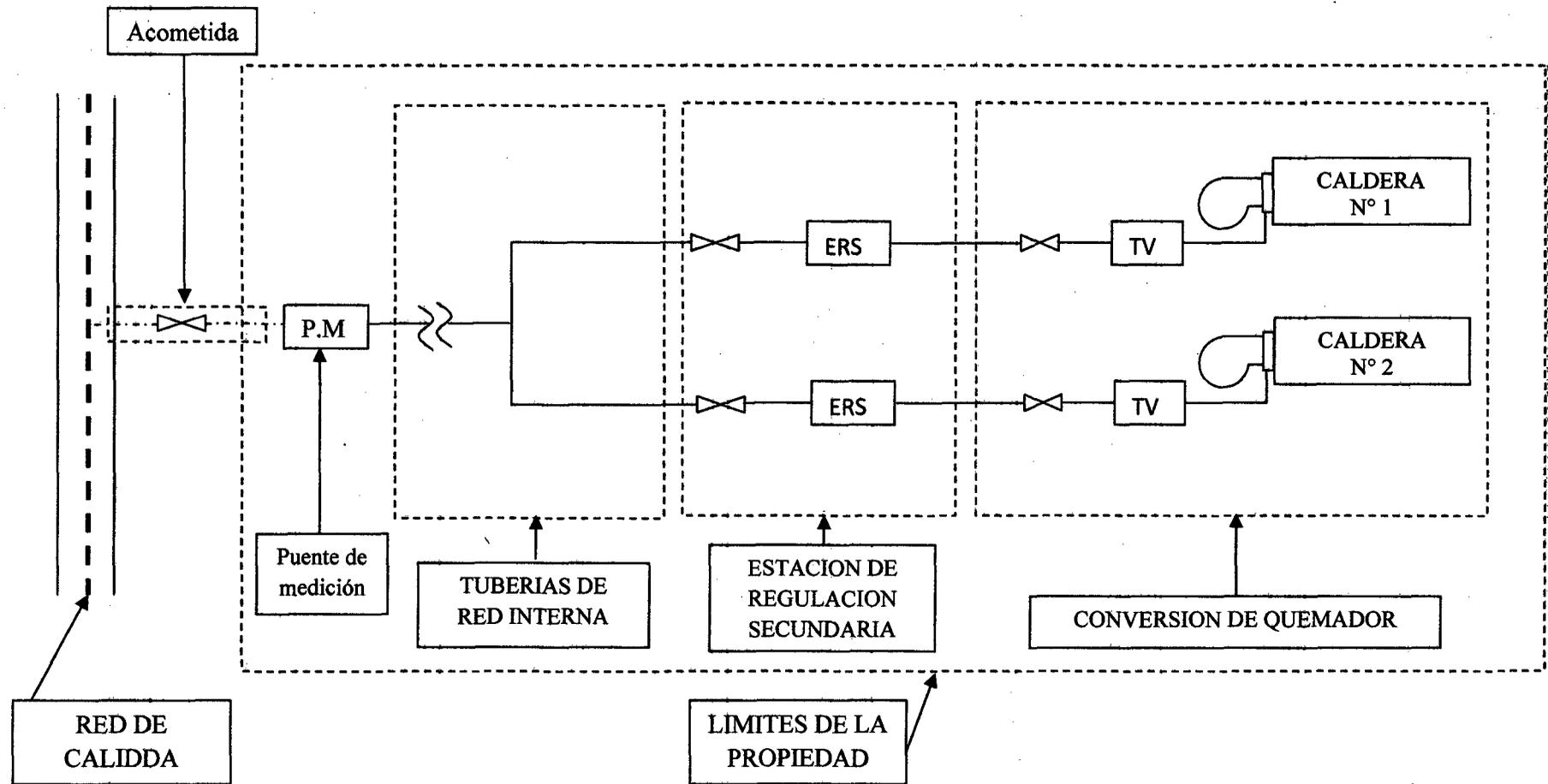
La realización de la parte experimental o aplicada de la tesis implica un enorme costo (material, logístico y de infraestructura), lo cual hace muy difícil su ejecución; sin embargo, al presentarse la oportunidad de la implementación, se decide ejecutar esta investigación en las calderas de vapor de la empresa VOPAK SERLIPSA. Este capítulo tendrá la siguiente estructura: Toma de datos de campo (medidas del hogar, contrapresión de la cámara de combustión, medidas del cañón del quemador y cono refractario y lista de partes del quemador), cálculos varios (eficiencia de caldera, consumo de combustibles, aire de combustión, evaluación del ventilador del aire de combustión, cálculo del tamaño de llama, dimensionamiento de la chaqueta de inyección, dimensionamiento del tren de válvulas, dimensionamiento del ERS), evaluación del sistema de control de llama y, finalmente, se tendrá el quemador mixto.

3.2 TOMA DE DATOS DE CAMPO

3.2.1 INSTALACIÓN INTERNA

La instalación interna industrial para este caso consta de la acometida, puente de medición, redes internas, Estación de regulación secundaria y la conversión de quemadores de Petróleo Industrial N° 6 a Gas Natural. (Ver Figura N° 3.1), siendo la parte de conversión de quemadores la correspondiente al presente trabajo.

Figura N° 3.1. Diagrama de flujo de la Instalación interna de Gas Natural



Cuando la red del proveedor de gas natural (Calidda) es menor o igual a 5 bar se usa directamente un puente de medición de doble ramal, pero generalmente la red en zonas industriales está entre 5 a 10 bar, en esos casos se usa una Estación de regulación y medición ERMP en lugar del puente de medición. El caso en estudio se encuentra con una presión menor a 5 bar, por lo cual se decide usar directamente el puente de medición.

El quemador materia de este estudio, es de petróleo industrial N° 6, para hogar presurizado, compacto, para servicio permanente, con ventilador, automático, modulante; que luego se convertirá en un quemador mixto.

3.2.2 DATOS DE LA CALDERA Y QUEMADOR

Los datos de la caldera de vapor a intervenir son:

- Marca: Equipos Térmicos
- Potencia: 1.687.000 kcal/h (1.961,981 kW)
- Presión de trabajo Max: 8,62 bar
- Combustible: Petróleo Industrial N° 6
- Consumo de combustible: 200,6 l/h
- Generación de vapor nominal: 3.136 kg/h

Los datos del quemador son:

- Modelo: FDS. 10,7
- Atomización dual: aire-vapor

3.2.3 DATOS OPERATIVOS

Se tomarán dos parámetros de combustión muy importantes previa a la conversión a la presión de operación (110-125psi), los cuales son: la contrapresión del hogar y pérdidas de gases de combustión.

3.2.4 CONTRAPRESIÓN DEL HOGAR

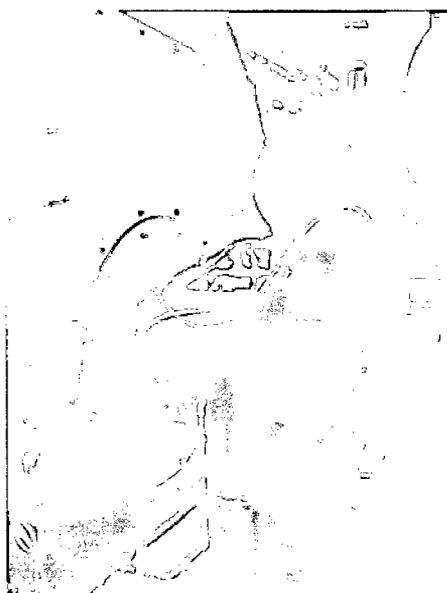
Es la presión dentro del hogar en las condiciones actuales de operación con petróleo industrial N° 6. Esta contrapresión permite determinar la presión de empuje requerido en el toroide; la misma debe ser capaz de vencer la caída de presión producida por el paso del gas natural por los agujeros de inyección más la contrapresión de la cámara de combustión.

Se tomaron medidas de contrapresión en mm de columna de agua (Ver Tabla N° 3.1).

Tabla N° 3.1 Medición de de Contrapresión

Contrapresión	Tipo de llama		
	Baja	Media	Alta
mm H ₂ O	3	5	7
mbar	0,3	0,5	0,7

Figura N° 3.2 Medición de la contrapresión



3.2.5 PÉRDIDAS DE GASES DE COMBUSTIÓN

Llamada también eficiencia térmica, sirve para medir de forma indirecta la eficiencia total de la caldera agregando las pérdidas por radiación y convección y pérdidas varias.

Para la medición de las pérdidas en mención se uso el Analizador de gases marca TESTO, modelo T325 XL. A una presión de vapor saturado de 110 -125 PSI y temperatura del vapor saturado entre 173,5 – 178,3 °C

En la Tabla N° 3.2 se presenta los resultados obtenidos de las mediciones realizadas de la caldera operando con petróleo industrial N° 6 antes del deshollinado.

Tabla N° 3.2 Medición de pérdidas de gases de combustión en operación

Símbolos	Unidades	Tipo de llama		
		Baja	Media	Alta
FT	°C	245,3	282,4	293,9
O ₂	%	4,2	5,1	4,7
CO	Ppm	9	12	18
EFF	%	86,6	84,5	84,3
CO ₂	%	13,4	12,6	13
EX/A	%	23,5	30,4	26,8
AT	°C	29	29	29

Leyenda:

FT: temperatura de Gases ; EFF: eficiencia térmica; EX/A: exceso de aire; AT: temperatura ambiente.

En donde podemos ver que la eficiencia térmica promedio es de 85,13%.

En la Tabla N° 3.3, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas de la caldera después de realizado un deshollinado y operando con petróleo industrial N° 6.

**Tabla N° 3.3 Medición de pérdidas de gases de combustión después del
Deshollinado**

Símbolos	Unidades	Tipo de llama		
		Baja	Media	Alta
FT	°C	184,8	191,4	209
O2	%	4,6	4,6	5,2
CO	PPM	16	15	14
EFF	%	88,7	88,4	87,4
CO2	%	13,1	13,1	12,6
EX/A	%	26	26,1	31
AT	°C	25,6	25,6	25,6

Leyenda:

FT: temperatura de Gases ; EFF: eficiencia térmica; EX/A: exceso de aire; AT: temperatura ambiente.

En donde podemos ver que la eficiencia térmica promedio es de 88,16%; este valor será usado para el recálculo térmico de la caldera.

3.2.6 MEDIDAS DE LA CALDERA

En la Tabla N° 3.4 se indican las medidas de la caldera de vapor.

Tabla N° 3.4 Medidas geométricas de la caldera

Parámetro	Longitud (mm)
Diámetro interior del hogar	736
Longitud del hogar	3.500
Diámetro interior cámara de hogar	1.480
Longitud cilíndrica cámara hogar	750
Número de tubos	88
Diámetro de los tubos de humo	76,2
Longitud de los tubos de humo	3.500

En la Figura N° 3.3 se presenta la distribución de tubos y en la Figura N° 3.4 se presenta las medidas geométricas del hogar de la caldera.

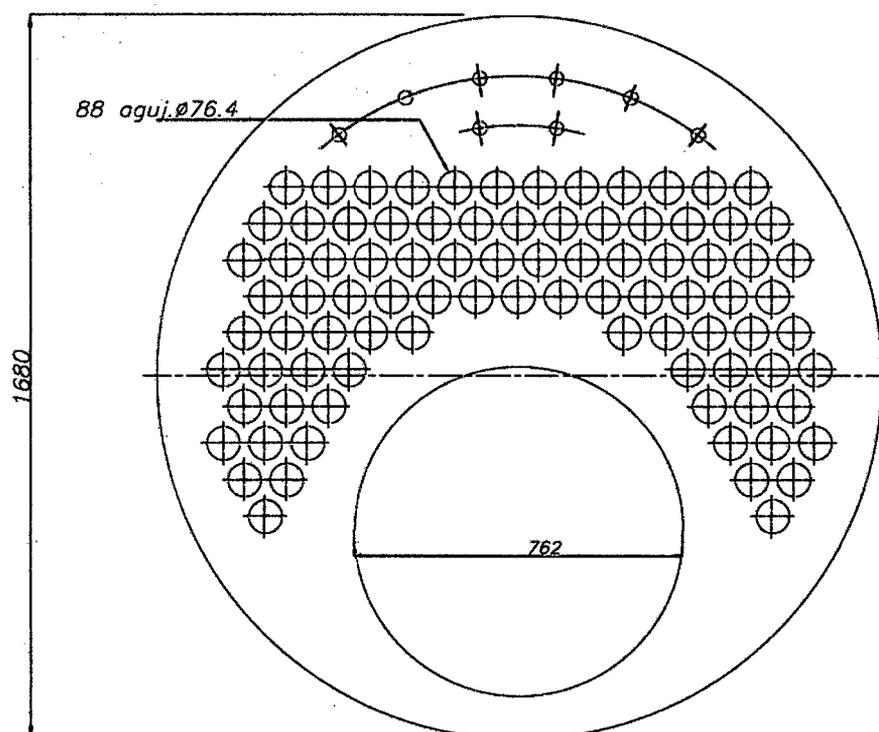
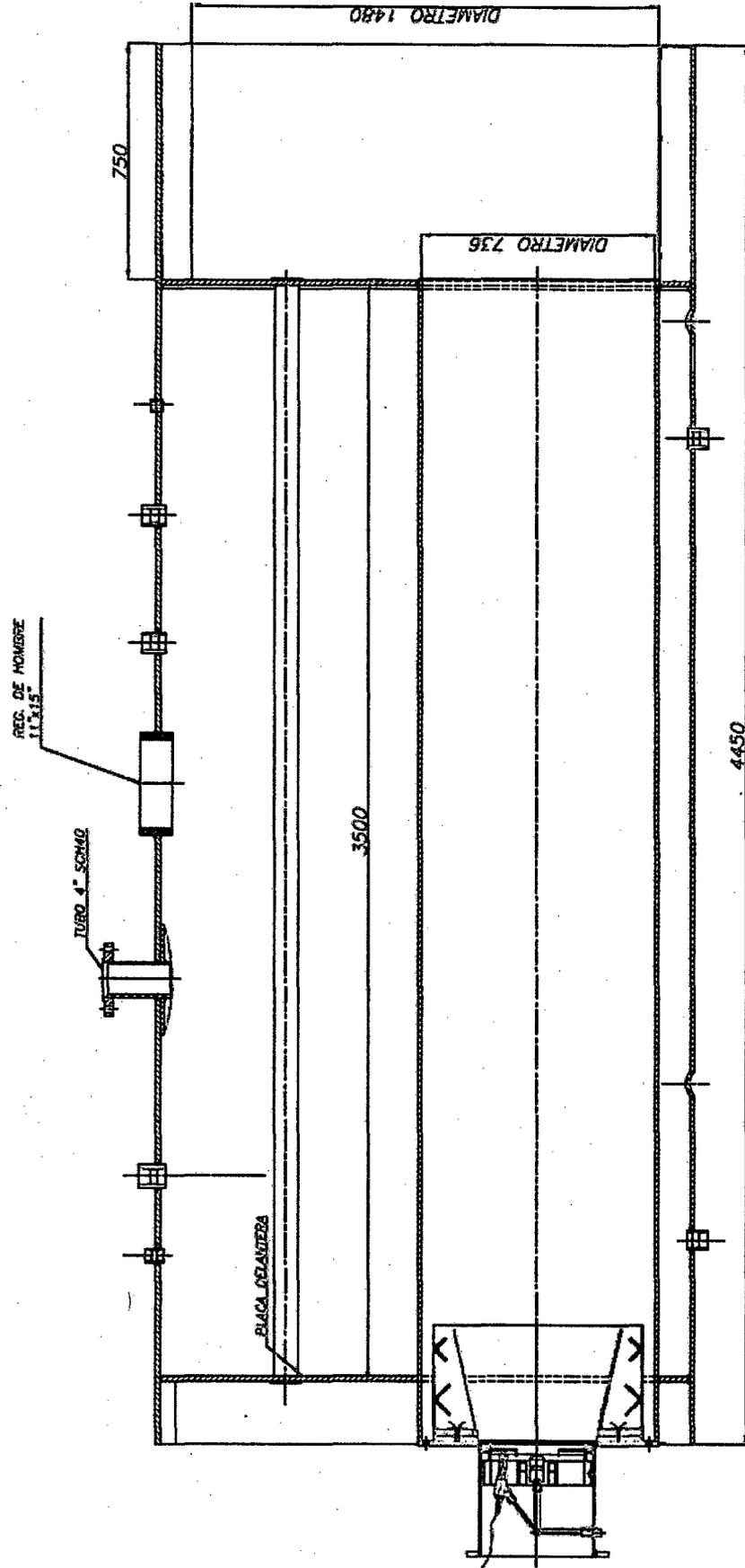
Figura N° 3.3 Placa portatubos

Figura N° 3.4 Medidas geométricas del hogar



3.2.7 MEDIDAS DEL CAÑÓN DEL QUEMADOR

En la Figura N° 3.5 se presenta las medidas del cañón del quemador.

3.2.8 MEDIDAS DEL CONO REFRACTARIO

En la Figura N° 3.6 se presenta las medidas del cono refractario.

Figura N° 3.5 Cañón del Quemador

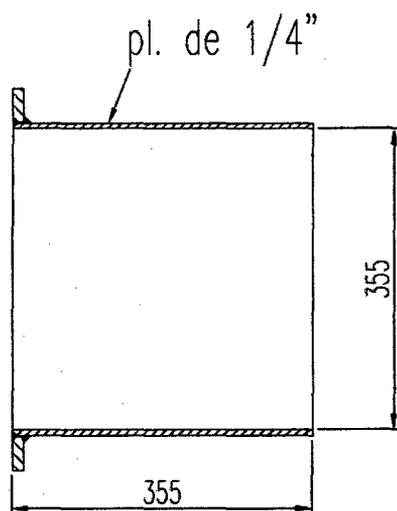
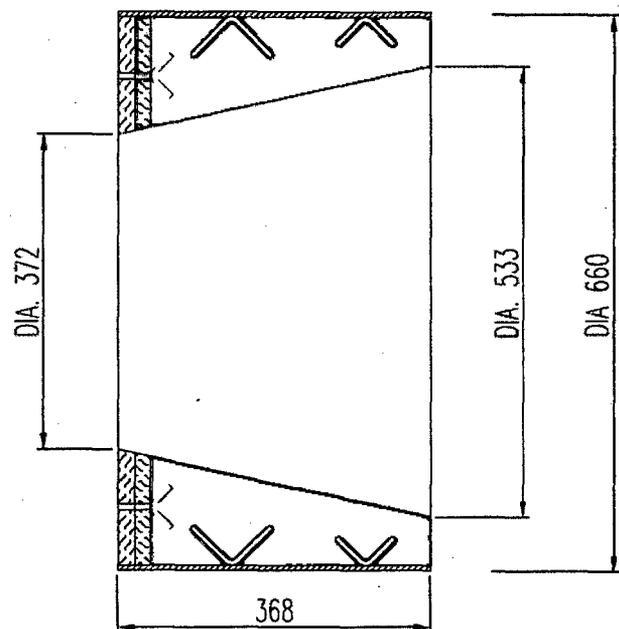


Figura N° 3.6 Cono refractario



3.2.9 LISTA DE PARTES DEL QUEMADOR ACTUAL

3.2.9.1 PARTES DEL QUEMADOR

En la Tabla N° 3.5 se presenta la lista de partes del quemador antes de la modificación

Tabla N° 3.5 Partes del Quemador

Ítem	Cant.	Descripción	Marca
1	1	Tobera Monarch de 60 GPH por 60°	Monarch
2	1	Difusor de Acero Inoxidable 353 mm diámetro.	Etepsa
3	1	Difusor de Fe. Ne. 353mm diámetros.	Etepsa
5	1	Motor eléctrico de 7.5 HP X 3520 RPM	Delcrosa
6	1	Ventilador de 9 15/16" x 5" de giro horario mirando desde el motor.	Etepsa
7	2	Paletas de regulación de aire	Etepsa
8	1	Válvula solenoide 1/2" diámetro - BOB 120 V-NC - para petróleo Bunker	Mac. ASCO
9	1	Piloto de encendido	Etepsa
10	1	Transformador de ignición de 120 V - 6000 V.	Webster
11	1	Válvula solenoide diámetro. 3/8"NPT, bobina 120 V. 0-50 PSI - NC.	Marca Skinner
12	1	Manómetro de 0-100 PSI dial 2 1/2"	WIKA
13	1	Válvula reguladora de caudal 3/8"	Hauck
14	1	Válvula solenoide principal de 1/2" BOB 120V - NC, para r-500, tipo F 661592	Marca Asco
15	1	Válvula Fulflo de 1/2", modelo: WS (30-100 psi)	Fulflo
16	1	Manómetro de 0-300 PSI dial 2 1/2"	Wika
17	1	Termómetro de 0-300°C dial 3", bulbo 4"conexión 1/2"NPT	Conexión 1/2" NPT.
18	1	Bomba de petróleo modelo 2 AM02	Roper

3.2.9.2 CONTROLES DE COMBUSTIÓN Y PANEL DE CONTROL

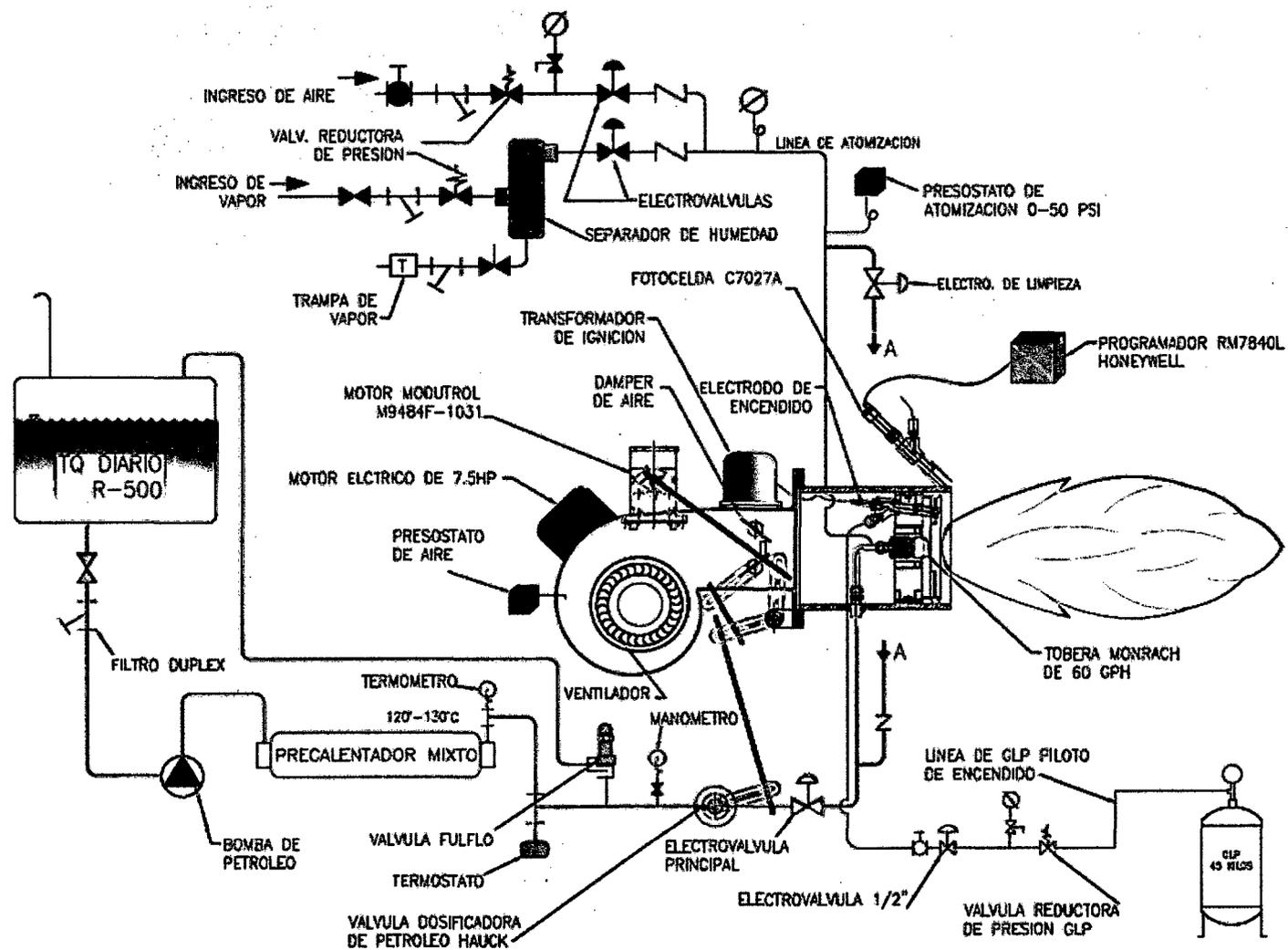
Tabla N° 3.6 Partes de Control de combustión y panel de control

ITEM	CANT	DESCRIPCION	MARCA
1	1	Fotocelda ultravioleta C7027A	Honeywell
2	1	Motor modutrol M 9484 F - 1031 - 24 V	Honeywell
3	1	Reóstato de modulación 270 Ohmios	Honeywell
4	1	Interruptor de la bomba de petróleo.	Telemecanique
5	1	Interruptor del quemador.	Telemecanique
6	1	Presostato L91B 0-150 PSI.	Honeywell
7	1	Programador Honeywell serie RM7840L	Honeywell
8	1	Amplificador R7849A-1015	Honeywell
9	1	Modulo de Display con teclado en español ST 7800A 1068	Honeywell
10	1	Tarjeta de purga, 30seg. ST 7800A-1039	Honeywell
11	1	Switch de aire C645C-1020.	Honeywell

3.2.10 DIAGRAMA DE FLUJO DEL QUEMADOR ACTUAL

Ver figura N° 3.7

Figura N° 3.7 Diagrama de Flujo



3.3 CÁLCULOS

3.3.1 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA

Considerando el método indirecto, de los datos tomados de campo se tiene que la eficiencia térmica después del deshollinado varía desde 88,7% hasta 87,4%; por lo tanto, la eficiencia térmica promedio será: 88,16% y las pérdidas por los gases de la chimenea será de 11,84%.

Sabemos que las pérdidas por radiación, convección y otras varias está entre 1% a 3%. Tomaremos de forma conservativa el valor promedio de 2,5%, Por lo tanto, la pérdida total será: 11,84% + 2,5% = 14,34%.

$$\frac{\dot{Q}_g}{\dot{Q}_c} \times 100\% = 11,84\%$$

$$\frac{\dot{Q}_{cro}}{\dot{Q}_c} \times 100\% = 2,5\%$$

Luego reemplazando en la formula: $\eta = \left(1 - \frac{\dot{Q}_g}{\dot{Q}_c} - \frac{\dot{Q}_{cro}}{\dot{Q}_c}\right) \times 100\%$ se tiene:

$$\eta = (100\% - 11,84\% - 2,5\%) = 85,66\%$$

$$\eta = 85,66\%$$

Para efectos de cálculo consideramos la eficiencia de la caldera en 85,66 % medidos sobre la base del Poder Calorífico Superior.

3.3.2 CÁLCULO DEL CONSUMO DE PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6

Sabemos que:

$$- \text{ La eficiencia: } \eta = \left(\frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_c}\right) \times 100\% \quad (3.1)$$

$$- \text{ El calor del combustible es: } \dot{Q}_c = \dot{m}_f \times \text{PCS} \quad (3.2)$$

De los datos y cálculos previos, tenemos:

- Potencia neta de la caldera: $\dot{Q}_a = 1.687.000 \text{ kcal/h}$ (1.961,981 kW)
- Eficiencia: $\eta = 85,66\%$
- Poder calorífico superior: PCS = 10.220 kcal/kg

Reemplazando (3.2) en (3.1) y despejando el flujo másico de petróleo (\dot{m}_f) se tiene:

$$\dot{m}_f = \dot{Q}_a / \eta \times \text{PCS} \quad (3.3)$$

Reemplazando valores en (4.3), se tiene:

$$\dot{m}_f = 192,7019 \text{ kg/h de petróleo industrial N}^{\circ} 6$$

3.3.3 CÁLCULO DEL CONSUMO DE GAS NATURAL

El calor del combustible es:

$$\dot{Q}_c = \dot{V}_{gn} \times \text{PCS} \quad (3.4)$$

Conociendo la potencia neta de la caldera:

$$\dot{Q}_a = 1.687.000 \text{ kcal /h (1.960,67kW)}$$

Según el fabricante de calderas Cleaver Brooks, la eficiencia de la caldera de petróleo industrial N° 6 al usar gas natural disminuye entre 3,7% y 3,8%; por lo tanto, para un diseño conservativo se considerará que la eficiencia de la caldera con gas natural es 3,75% menor que el petróleo industrial N° 6:

$$\eta = 81,91\%$$

Además:

- Poder calorífico superior del gas natural es: PCS = 9.652 kcal/Sm³

- Densidad relativa: 0,613, luego la densidad será $\rho_{gn} = 0,7513 \text{ kg/Sm}^3$

Luego reemplazando (3.4) en (3.1) y despejando V_{gn} se tiene:

$$\dot{V}_{gn} = \dot{Q}_a / \eta \times PCS \quad (3.5)$$

Reemplazando valores en (3.5) se tiene:

- Flujo de gas natural en condiciones estándares: $\dot{V}_{gn} = 213,3835 \text{ Sm}^3/\text{h}$
- Flujo de gas natural en condiciones normales: $\dot{V}_{gn} = 202,2697 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- Flujo másico de gas natural: $\dot{m}_{gn} = 160,32 \text{ kg/h}$

3.3.4 CÁLCULO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN PARA PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6

En la Tabla N° 2.7, se muestra el análisis porcentual en peso de los componentes del petróleo N° 6:

Combustible	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre
	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>
Petróleo Industrial 6	87,1	11,6	0,3	0,2	0,9

Fuente: Petroperú.

Además sabemos que la relación teórica de aire /combustible se puede calcular usando la siguiente fórmula (2.26):

$$V_{atf} = 0,08882C + 0,26453H + 0,03327S - 0,03333O \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Luego reemplazando los valores en la Ecuación (2.26), se obtiene:

$$V_{atf} = 10,8247 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

También sabemos que el flujo másico del combustible es $\dot{m}_f = 192,7019 \text{ kg/h}$

Luego el flujo volumétrico teórico (aire teórico) será:

- $\dot{V}_{at} = V_{atf} \times \dot{m}_f = 10,8247 \text{ Nm}^3/\text{kg} \times 192,7019 \text{ kg/h} = 2.085,9435 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- Flujo volumétrico del aire teórico de combustión: $\dot{V}_{at} = 2.085,9435 \text{ Nm}^3/\text{h}$

De las mediciones de campo sabemos que el índice de exceso de aire $\lambda = 1,28$

Por lo tanto el flujo volumétrico real (aire real) será:

- $\dot{V}_{ar} = \lambda \times \dot{V}_t = 1,28 \times 2.085,9435 \text{ Nm}^3/\text{h} = 2.670,0077 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- Flujo volumétrico real: $\dot{V}_{ar} = 2.670,0077 \text{ Nm}^3/\text{h}$

3.3.5 CÁLCULO DEL AIRE TEÓRICO Y REAL DE COMBUSTIÓN PARA GAS NATURAL

En la Tabla N° 2.10, se muestra la composición porcentual de los componentes del gas natural:

Tabla N° 2.10 Composición del Gas Natural

Componente	Nomenclatura	Composición (%)
Metano	CH ₄	88,2898
Etano	C ₂ H ₆	10,5170
Propano	C ₃ H ₈	0,1551
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0,0084
i-Butano	C ₄ H ₁₀	0,0058
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	0,0008
i-Pentano	C ₅ H ₁₂	0,0011
Hexano	C ₆ H ₁₄	0,0007
Heptano	C ₇ H ₁₆	0,0005
Octano	C ₈ H ₁₈	0,0003
Nitrógeno	N ₂	0,7835
Gas Carbónico	CO ₂	0,2370

Fuente: COGA- Estación de medición U2201- Junio 2008

Además sabemos que la relación teórica de aire /combustible se puede calcular usando la ecuación (2.27):

$$V_{atf} = 0,0238(CO + H_2) + 0,00952CH_4 + 0,0476 \sum_i \left(m_i + \frac{n_i}{4}\right) C_{mi}H_{ni} - 0,0476O_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3.$$

Luego, reemplazando los valores en la ecuación anterior, se obtiene:

$$V_{atf} = 10,192 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3$$

Se sabe que el flujo volumétrico del gas natural es $\dot{V}_{gn} = 202,2697 \text{ Nm}^3/\text{h}$, luego el aire teórico será:

$$\dot{V}_{at} = V_{atf} \times \dot{V}_{gn} = 10,192 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \times 202,2697 \text{ Nm}^3/\text{h} = 2.061,5535 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{at} = 2.061,5535 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ (flujo volumétrico del aire teórico de combustión)}$$

Para la postura conservadora de los cálculos, se considera que el índice de exceso de aire $\lambda = 1,22$

Por lo tanto, el flujo volumétrico de aire real de combustión para gas natural será:

$$\text{El aire real será: } \dot{V}_{ar} = \lambda \times \dot{V}_{at} = 1,22 \times 2.061,5535 \text{ Nm}^3/\text{h} = 2.515,0953 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

- Flujo volumétrico del aire real de combustión para gas natural:

$$\dot{V}_{ar} = 2.515,0953 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

3.3.6 EVALUACIÓN DEL VENTILADOR DE AIRE DE COMBUSTIÓN

De los cálculos realizados podemos notar que el aire teórico para combustión con el petróleo industrial N° 6 es 1% mayor que el aire teórico necesario para la combustión de gas natural, así también el aire real para combustión con el petróleo industrial N° 6 es 6,15% mayor que el aire real para combustión con el gas natural.

Por lo tanto, el ventilador instalado en el quemador actual cumple perfectamente con los nuevos requerimientos de aire para la combustión con el gas natural, sólo será necesario controlar la relación aire combustible calibrando el dámper del aire (Ver Tabla N° 3.7).

Tabla N° 3.7 Requerimiento de aire de combustión

	Petróleo industrial N° 6	Gas natural	Unidades
Aire teórico (\dot{V}_{at})	2.085,9435	2.061,5535	Nm ³ /h
Aire real (\dot{V}_{ar})	2.670,0077	2.515,0953	Nm ³ /h

3.3.7 CALCULO DE LOS GASES GENERADOS EN LA COMBUSTION DE PETROLEO INDUSTRIAL N° 6

Sabemos que:

El flujo másico del combustible es $\dot{m}_f = 192,7019 \text{ kg/h}$

Índice de exceso de aire es $\lambda = 1,28$

Relación teórica de aire combustible es $V_{atf} = 10,8247 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Además sabemos que el volumen de gases de combustión por kg de combustible se puede calcular usando la formula (2.40)

$$V_{gf} = \lambda V_{atf} + 0,05558H + 0,0070 + 0,008N + 0,01244H_2O \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Reemplazando λ , V_{atf} y los valores de la tabla N° 2.7 en la ecuación anterior

tenemos: $V_{gf} = 14,504 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de combustible

Luego el flujo volumétrico real de gases de combustión será:

$$\dot{V}_g = V_{gf} \times \dot{m}_f = 14,504 \text{ Nm}^3/\text{kg} \times 192,7019 \text{ kg/h} = 2794,961 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_g = 2794,961 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

3.3.8 CALCULO DE LOS GASES GENERADOS EN LA COMBUSTION DEL GAS NATURAL

Sabemos que:

El flujo volumétrico del combustible es $\dot{V}_{gn} = 202,2697 \text{ Nm}^3/\text{h}$,

Índice de exceso de aire es $\lambda = 1,22$

Relación teórica de aire combustible es $V_{atf} = 10,192 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3$

Además sabemos que el volumen de gases de combustión por Nm^3 de combustible se puede calcular usando la formula (2.45)

$$V_{gf} = \lambda V_{atf} + 1 - 0,005(CO + H_2) + 0,0025 \sum_i (y_i - 4) C_{xi} H_{yi} \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Reemplazando λ , V_{atf} y los valores de la tabla N° 2.10 en la ecuación anterior

tenemos: $V_{gf} = 13,49 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$ de combustible

Luego el flujo volumétrico real de gases de combustión será:

$$\dot{V}_g = V_{gf} \times \dot{m}_f = 13,49 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \times 202,2697 \text{ Nm}^3/\text{h} = 2728,2609 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_g = 2728,2609 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

3.3.9 EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE GASES DE COMBUSTIÓN GENERADOS

De los cálculos realizados podemos notar que la cantidad de gases producidos con gas natural en condiciones reales de operación es 2,44% menor a los producidos con petróleo industrial N° 6, por lo tanto el área de flujo de los tubos de humo, ductos de evacuación y chimenea no requieren ninguna modificación para operar correctamente con gas natural.

3.3.10 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES TEÓRICAS DE LLAMA Y EVALUACIÓN DEL TAMAÑO DEL HOGAR

Conocidos los valores del consumo del gas natural , podemos pasar a verificar las dimensiones del corazón de la caldera, es decir, el espacio apropiado donde se debe desarrollar y completar la combustión del combustible aportado, el diámetro y longitud del hogar siempre serán ligeramente superiores a las dimensiones de la llama.

3.3.10.1 CÁLCULO DE DIMENSIONES DE LLAMA

Calcularemos las dimensiones teóricas de llama, según DIN 4787 y DIN 4788:

$$D = 0,17B^{1/3,5} \quad (3.6)$$

$$L = 0,2B^{1/2} \quad (3.7)$$

Donde:

B: Consumo de combustible en kg/h del equivalente del petróleo industrial N° 6

D: Diámetro de la llama en mm

L: Longitud de la llama en mm

Las ecuaciones (3.6) y (3.7) son tomadas del “Curso Diseño de Calderas Piro-tubulares”, Francisco Latre Durso, Deposito legal n° Z-2355-2005 -España - <http://www.tecnologiacalderas.com>

De los cálculos anteriores sabemos que:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_f \times PCS = 192,7019 \text{ kg/h} \times 10.220 \text{ kcal/kg} = 1.969.413,418 \text{ kcal/h}$$

$$\text{PCS del gas natural} = 12.847 \text{ kcal/kg} \quad (53,758 \text{ MJ/kg})$$

Podemos calcular el consumo de combustible equivalentes al petróleo industrial N° 6 (B), usando la siguiente relación:

$$B = \dot{Q}_c / \text{PSC del gas natural}$$

Por lo tanto, reemplazando valores en la relación anterior, el consumo de combustible equivalentes al petróleo industrial N° 6 será:

$$B = 153.297 \text{ kg/h.}$$

Y luego, reemplazando el consumo en las ecuaciones (3.6) y (3.7), se obtiene:

$$D = 716 \text{ mm y } L = 2.476 \text{ mm.}$$

3.3.10.2 EVALUACIÓN DEL TAMAÑO DEL HOGAR

En la Tabla N° 3.8 podemos notar que el diámetro del hogar es ligeramente mayor que el diámetro de la llama y la longitud del hogar es considerablemente más grande que el de la llama (en un 41%); se ve que las dimensiones del hogar cumplen con las estándares internacionales, por lo tanto, no habrá ningún problema de combustión debido a una falta de espacio.

Tabla N° 3.8 Comparación de dimensiones de Hogar y de llama.

	Diámetro (D)	Longitud(L)	Unidades
Dimensiones de llama	716	2.475	mm
Dimensiones del hogar	736	3.500	mm

3.3.11 CÁLCULO DE TEMPERATURAS AL FINAL DEL HOGAR

Calcularemos las temperaturas al final del hogar para ambos casos, es decir, cuando opera con gas natural y petróleo industrial N° 6, que será la temperatura

máxima al entrar al haz tubular asumiéndose que existe muy poca transmisión de calor en la cámara del hogar, esto nos permitirá evaluar el impacto del sobrecalentamiento de la placa posterior y los bordes de los tubos en contacto con la placa posterior por cambio de combustible. Usaremos la fórmula 13 de la UNE 9300.3 presentado en el “Curso Diseño de Calderas Piro-tubulares”, Francisco Latre Durso, Deposito legal nº Z-2355-2005 -España- <http://www.tecnologiacalderas.com>

$$\frac{T_r - T}{T_r} \times \frac{\dot{Q}_c}{A_r} = C \left(\frac{273 + T}{100} \right)^4 \quad (3.8)$$

Donde:

A_r = Superficie de radiación = πDL (Cámara seca)

\dot{Q}_c = Calor introducido basado en PCI en (kcal/h)

T = temperatura a la salida del hogar en ($^{\circ}C$)

$T_r = 2000^{\circ}C$ y $C = 4,1$ para petróleo industrial N°6

$T_r = 1800^{\circ}C$ y $C = 3,6$ para gas natural

3.3.11.1 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA (T) CON PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6

De los cálculos anteriores sabemos:

$\dot{m}_{gn} = 192,7019 \text{ kg/h}$ (para petróleo N° 6)

PCI = 9.670,5 kcal/kg (para el petróleo N° 6)

Entonces el calor introducido será:

$\dot{Q}_c = 192,7019 \times 9.670,5 = 1.863.524,239 \text{ kcal/h}$

Además:

$D = 0,736 \text{ m}$ (diámetro interior del hogar)

$$L = 3,329\text{m} \quad (\text{longitud útil radiante})$$

$$\text{Luego el área será: } A_r = 3,1416 \times 0,736 \times 3,329 = 7,697 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, reemplazando “ T_r ”, “ A_r ” y “ C ” en (3.8), obtenemos: $T = 1028,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.11.2 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA (T) CON GAS NATURAL

De los cálculos anteriores sabemos que:

$$\dot{m}_{gn} = 160,32 \text{ kg/h} \text{ y } PCI = 11.605,23 \text{ kcal/kg, aprox. } 10,7 \% \text{ menor al}$$

PCS (de cálculos propios).

Entonces, el calor introducido es:

$$\dot{Q}_c = 160,32 \times 11605,23 = 1.860.552,335 \text{ kcal/h}$$

Además:

$$D = 0,736 \text{ m} \quad (\text{diámetro interior del hogar})$$

$$L = 3,329 \text{ m} \quad (\text{longitud útil radiante})$$

$$\text{Luego, el área será: } A_r = 3,1416 \times 0,736 \times 3,329 = 7,697 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, reemplazando “ T_r ”, “ A_r ” y “ C ” en (4.8), obtenemos: $T = 1.029,15^\circ\text{C}$

Podemos esperar que la temperatura de gases a la salida del hogar se incrementará como máximo en $0,75^\circ\text{C}$ que, en este caso, es mínimo.

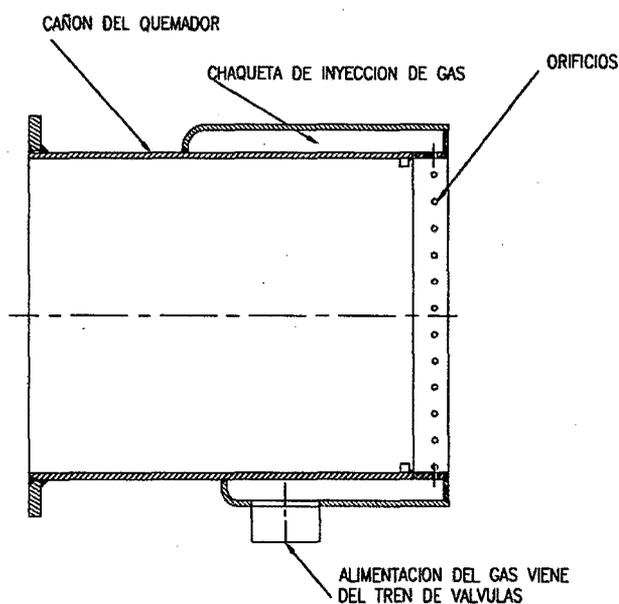
3.3.12 DIMENSIONAMIENTO DE LA CHAQUETA DE INYECCIÓN

El paso más importante en el desarrollo de esta tesis es definir la forma y ubicación del sistema de inyección del gas al quemador. El criterio a tener en cuenta será realizar un diseño que permita obtener un quemador mixto, que pueda trabajar con gas natural y con petróleo industrial N° 6, garantizándose en ambos casos su correcta operación.

Considerando el criterio mencionado decidimos mantener la ubicación del difusor, la tobera, el piloto de encendido y la fotocelda, sólo se colocará una chaqueta de inyección tratando de no variar las medidas originales del quemador. La instalación de la chaqueta de inyección tiene dos posibilidades las cuales se presentan a continuación:

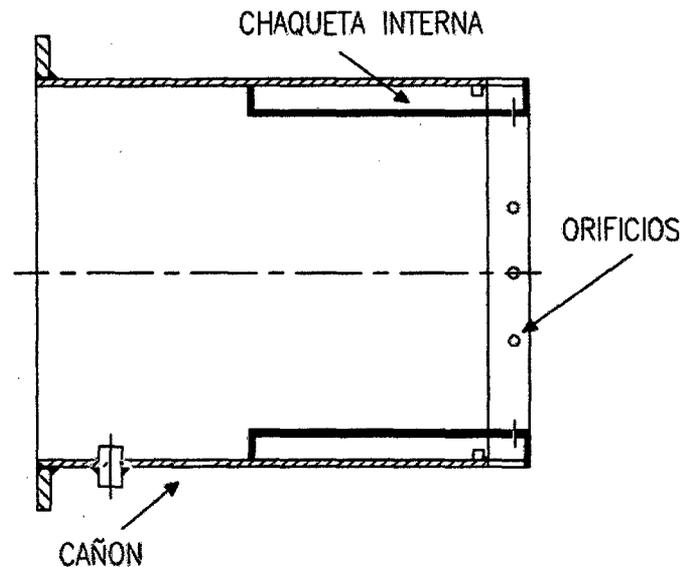
- a. Colocar una chaqueta cilíndrica externa al cañón del quemador y realizar perforaciones perpendiculares al flujo del aire. Tal como se muestra en la Figura N° 3.8

Figura N° 3.8 Cañón de quemador con Chaqueta externa



- b. Colocar una chaqueta cilíndrica interna al cañón del quemador y realizar perforaciones perpendiculares o paralelos al flujo del aire tal como de muestra en la Figura N° 3.9

Figura N° 3.9 Cañón de quemador con Chaqueta interna



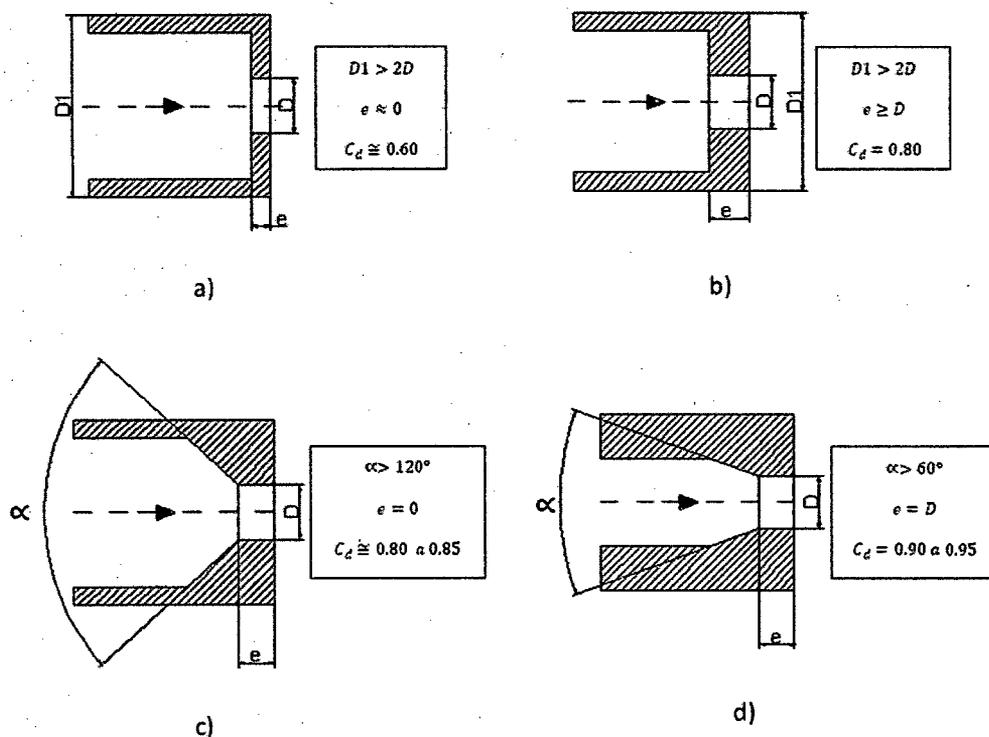
A fin de no modificar la ubicación de ningún componente y mantener el diseño original del quemador, se decidió por la primera opción, es decir, colocar la chaqueta en la parte externa.

El dimensionamiento de chaqueta de inyección consiste en calcular la caída de presión producida al paso de una determinada cantidad del gas por los orificios de inyección en función al diámetro y número de agujeros.

3.3.12.1 CÁLCULO DEL DIÁMETRO Y DEL NÚMERO DE AGUJEROS.

Para el dimensionamiento del agujero se considera las opciones de configuración de la Figura N° 3.10.

Figura N° 3.10 Diámetros para inyección de aire



Fuente: Texto: Los G.L.P de Lorenzo Becco, Editorial Butano S.A.

El valor del coeficiente de descarga (C_d) depende de las dimensiones geométricas y tipo de configuración, por lo tanto, escogeremos una configuración que nos permita obtener un valor confiable.

Como el espesor del cañón del toroide es 6,35 mm y el diámetro del agujero escogido será también de 6,35 mm, entonces se usará la configuración (b) de la Figura N° 3.11 y por lo tanto el coeficiente de descarga será de $C_d = 0,8$.

3.3.12.2 CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

El flujo de gas natural a través de un orificio puede ser determinado por la ecuación (3.9), tomado del *Engineering Guide Combustion* de la empresa Eclipse Inc., de donde se despejará la caída de presión Δp .

$$\dot{V} = 1.658,5 \times A \times C_d \times \sqrt{\frac{\Delta p}{g}} \quad (3.9)$$

Donde:

\dot{V} : Caudal en Spies³/h

A: área del orificio en pulg²

C_d: coeficiente de descarga del orificio

Δp : caída de presión a través del orificio en pulgadas de columna de agua.

g: gravedad específica del gas, en condiciones estándar.

Luego conocido el flujo de gas natural:

- Flujo de gas natural en condiciones estándares: $\dot{V}_{gn} = 213,3835 \text{ Sm}^3/\text{h}$.
- Flujo de gas natural en condiciones normales: $\dot{V}_{gn} = 202,2697 \text{ Nm}^3/\text{h}$.
- Flujo másico de gas natural: $\dot{m}_{gn} = 160,32 \text{ kg/h}$
- Diámetro del agujero: 6,35mm
- Gravedad específica: 0,613
- C_d: 0,8

Además se tiene que cumplir:

- Contrapresión de la cámara: pcc = 1mbar
- Presión en el chaqueta de inyección: p₉ :

$$P_9 > \Delta p + pcc \quad (3.10)$$

El cálculo final lo realizaremos por iteración tomando cierta cantidad de agujeros y calculando la caída de presión de forma tal que la presión en la chaqueta coincida con la presión P₉ calculada en el tren de válvulas. En la Tabla N° 3.9 se presenta el resultado de la iteración.

Tabla N° 3.9 Cálculos de la Chaqueta de inyección de gas natural

Descripción	Unid.	Valores	Observaciones
Caudal total del gas	Spies ³ /h	7.535,5671	-----
Diámetro de los agujeros	pulg.	0,25	Asumido
Área del agujero	pulg ²	0,0490875	-----
Número de agujeros	s/u	28	-----
Coefficiente de descarga	s/u	0,8	-----
Gravedad específica	s/u	0,613	-----
Caudal por agujero	Spies ³ /h	269,2393	-----
Caída de presión (Δh)	Pulg. Agua	10,451	(25.9798 mbar)

Por lo tanto, la presión mínima en la chaqueta de inyección necesaria se obtiene reemplazando en la ecuación (4.10):

$$P_9 \Rightarrow \Delta p + P_{cc} = 26 + 1 = 27 \text{ mbar} \Rightarrow P_{cc} 27 \text{ mbar}$$

3.3.13 DIMENSIONAMIENTO DEL TREN DE VÁLVULAS

El dimensionamiento del tren de válvulas consiste en seleccionar el diámetro adecuado para no tener grandes velocidades y en calcular la caída de presión en el ramal de válvulas, esta caída de presión más la presión de la chaqueta de inyección será el que deberá entregar la Estación de regulación secundaria (ERS).

La configuración del tren de válvulas seleccionado se presenta en la Figura N° 3.11 y la lista de partes se presenta en la Tabla N° 3.10.

Figura N° 3.11 Configuración de Tren de válvulas

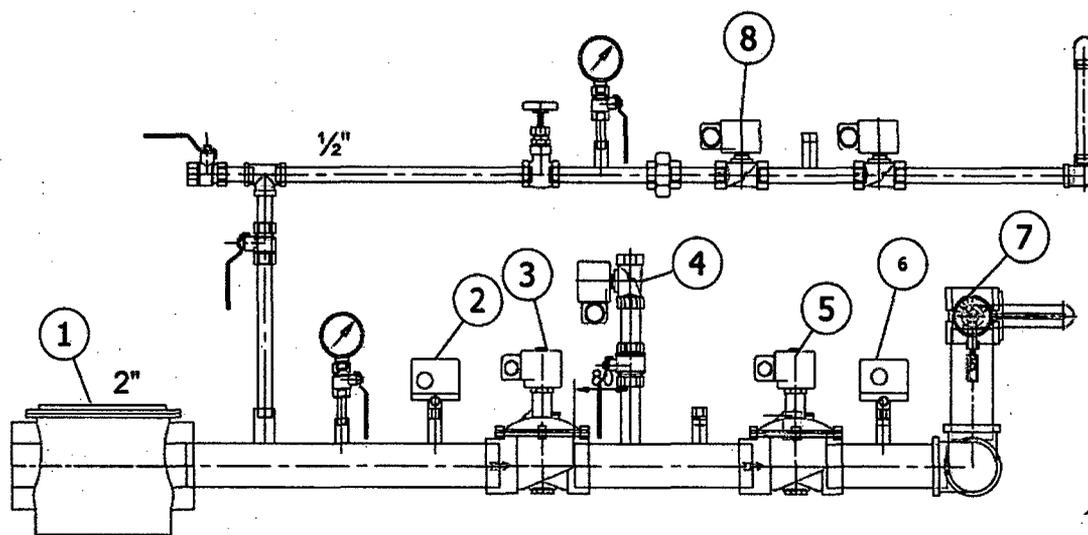


Tabla N° 3.10 Lista de Partes del Tren de válvulas

Ítem	Cant.	Unid.	Descripción	Material
1	02	Pza	Válvula solenoide 1/2" NPT 1330LA04 BOB 120 NC	Jefferson
2	03	Pza	Manómetros de 0-300 mbar dial de 2 1/2"	----
3	01	Pza	Filtro para gas 2" malla 50 micras	Helmont
4	1	Pza	Interruptor de presión C6097A 12-60 pulg. agua de baja presión	Honeyweel
5	1	Pza	Válvula solenoide Jefferson modelo 2030LA16L de 2" Ø NPT volt. 120V - NC. De apertura lenta	Jefferson
6	1	Pza	Válvulas Solenoide "Jefferson" mod. 1330LA06 NA, 3/4"npt, 120V.	----
7	02	Pza	Interruptor de presión C6097B 12-60 pulg. agua de alta presión	Honeyweel
8	1	Pza	Válvula solenoide Jefferson modelo 2030LA16-I con Swicht microcontacto de prueba de válvula cerrada, de 2" Ø npt, volt. 120V, NC. De apertura lenta	Jefferson
9	01	Pza	Válvula mariposa para gas de 2 "	EQA

Para el cálculo de velocidades y caída de presión total usaremos las fórmulas de la Norma Técnica Peruana 111.010 y para la caída de presión específica en los aparatos más importantes tales como el filtro Helmont, electroválvulas Jefferson, y la válvula mariposa Eqa usaremos diagramas de pérdidas de cada fabricante que luego lo trasladaremos a la planilla de cálculo. En la Figura N° 3.12 se presenta el diagrama P&D del tren válvulas con la ubicación de los puntos de cálculo de presión; el punto "cc" es la contrapresión de la cámara de combustión. En la Tabla N° 3.11 se presenta la planilla de cálculo obtenida.

Figura N° 3.12 Diagrama P&D del Tren de válvulas.

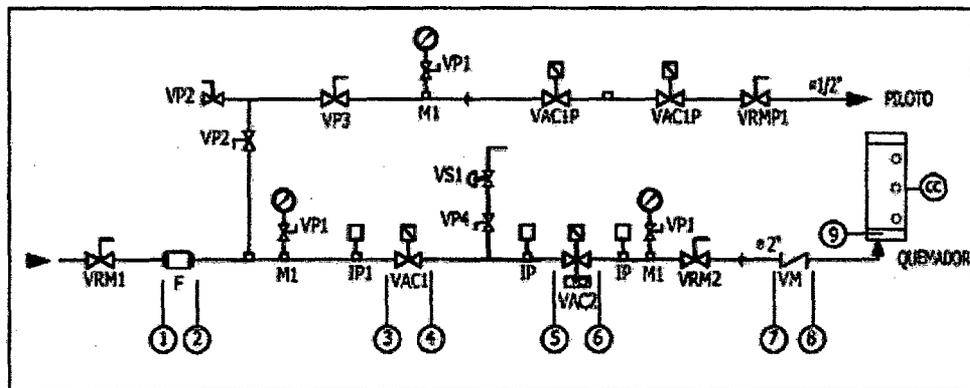


Figura N° 3.13 Partes del Tren de válvulas

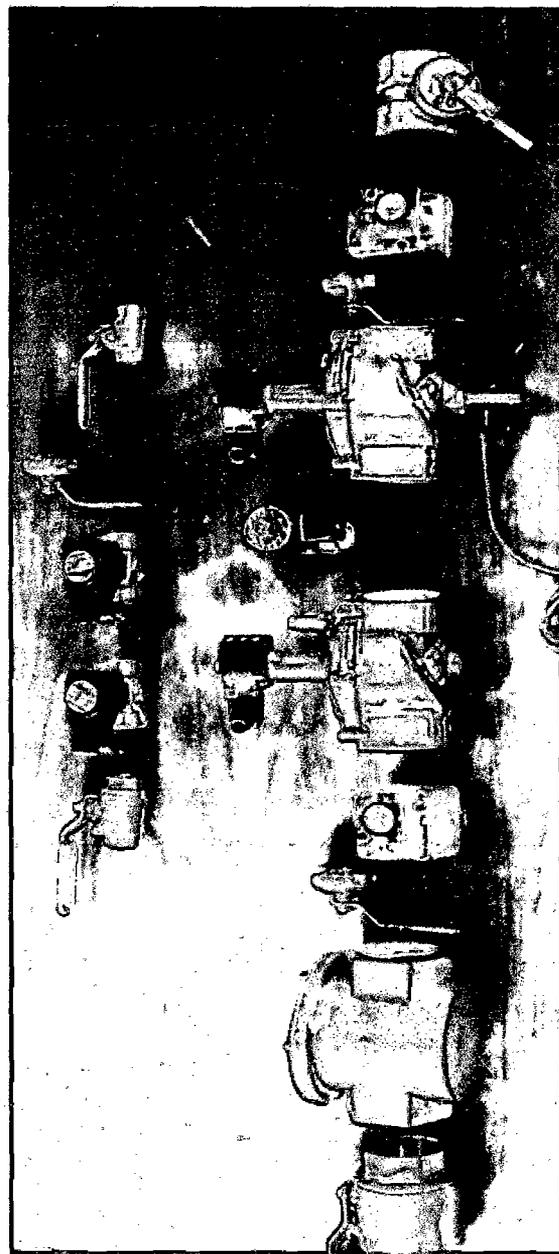


Tabla N° 3.11 Planilla de cálculo del tren de válvulas.

Tramo	Descripción	Longitud		Caudal Sm ³ /h	Presiones manométricas				Diámetro			Velocidad m/s
		real	cálc.		bar	Bar	bar	pérdidas	calculado	adopt	nominal	
		m	m	P1	P2	P1 - P2	%	mm	mm	pulg.		
ERS-1	Tubería existente	6,000	13,160	213,38	0,0820	0,0756	0,00637	7,77%	48,25	52,24	2	25,59
1 - 2	Filtro de 50 micras Helmont	0,130	3,880	213,38	0,0756	0,0711	0,00455	6,02%	48,39	52,24	2	26,06
2 - 3	Tubería nueva	0,450	0,450	213,38	0,0711	0,0705	0,00053	0,74%	48,49	52,24	2	26,17
3 - 4	Electroválvula Jefferson	0,146	13,646	213,38	0,0705	0,0544	0,01617	22,93%	52,24	52,24	2	26,18
4 - 5	Tubería nueva	0,250	0,250	213,38	0,0544	0,0541	0,00030	0,55%	48,87	52,24	2	26,58
5 - 6	Electroválvula Jefferson	0,146	13,446	213,38	0,0541	0,0379	0,01619	29,93%	48,88	52,24	2	26,59
6 - 7	Tubería nueva	1,175	3,375	213,38	0,0379	0,0338	0,00410	10,83%	49,25	52,24	2	27,01
7 - 8	Válvula mariposa de control Eqa	0,100	1,000	213,38	0,0338	0,0326	0,00122	3,61%	49,35	52,24	2	27,11
8 - 9	Tubería nueva	0,250	3,750	213,38	0,0326	0,0280	0,00458	14,07%	49,38	52,24	2	27,15

3.3.14 DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTACIÓN DE REGULACIÓN SECUNDARIA

Se trata de seleccionar de forma correcta la válvula reguladora de presión y los aparatos que conforman la ERS.

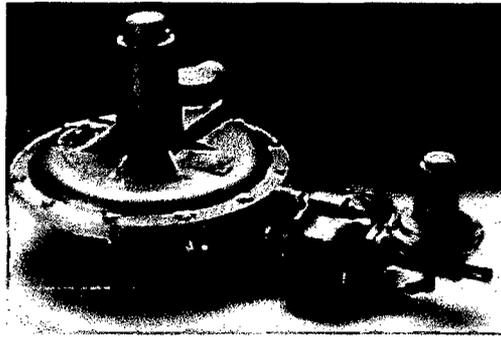
De las mediciones y cálculos realizados anteriormente tenemos:

- Caudal nominal de gas natural es 202,2697 Nm³/h.
- Caudal de la válvula deberá ser 25% más que el caudal nominal, por lo tanto, será aproximadamente: 253 Nm³/h.
- Presión al ingreso de la reguladora de presión 2,5 - 4,5 bar
- Presión de salida nominal: 82 mbar (obtenido del cálculo del tren de válvulas).

Por lo tanto, los valores para la selección de la válvula serán: presión de Ingreso 2,5 bar, presión de salida 82 mbar y caudal de 253 Nm³/h.

Con estos valores entramos al catálogo de válvulas reguladoras y seleccionamos la válvula marca Eqa Modelo 217 con válvula de bloqueo b17 con resorte R 31 con alambre de diámetro de 5,5 mm y diámetro de orificio de 19,1mm (Ver Figura N° 3.14), que da un caudal de 270 Nm³/h, donde el rango de regulación va desde 80 mbar hasta 150 mbar. La presión de bloqueo normalmente se selecciona por debajo de la presión máxima de sellado de las electroválvulas que en este caso será de 200 mbar.

Figura N° 3.14 Válvula Eqa modelo 217



La velocidad de circulación es en el lado de 2,5 bar de 7,9 m/s y en el lado de baja presión de 25,33 m/s , para la tubería de 2" de diámetro nominal.

En la Figura N° 3.15 se tiene el diagrama de la ERS y la Tabla N° 3.12 presenta la lista de partes.

Figura N° 3.15 Diagrama de la Estación de Regulación Secundaria

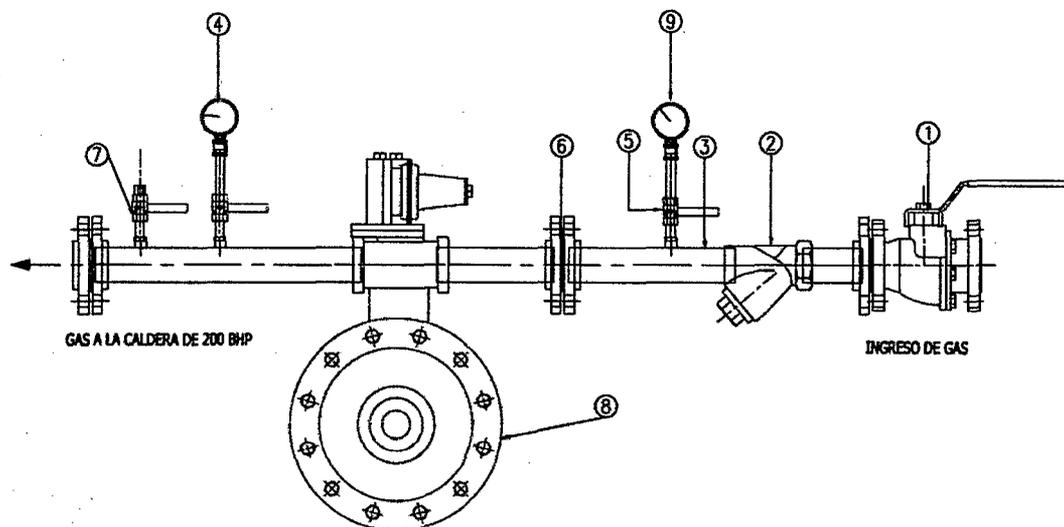


Tabla N° 3.12 Lista de Partes de la Estación de Regulación Secundaria

Ítem	Descripción
1	Válvula de bloqueo principal de 2" clase 150 psi
2	Filtro tipo y de 2" con cuerpo de acero
3	Tuberías sch 40 Astm A106
4	Manómetro de 0-250 psi dial de 2 ½" de alta
5	Válvula tipo aguja de ½" clase 150 psi
6	Bridas tipo anillo de 2" clase 150 psi
7	Válvula de venteo tipo esférica de ½"
8	Válvula Reductora de presión Mod. 217 EQA
9	Manómetro de 0-160 psi dial de ½" de baja

3.4 IMPLEMENTACIÓN

3.4.1 MODIFICACIÓN ELECTROMECAÁNICA

Considera modificaciones en la parte mecánica y recableado eléctrico de los nuevos aparatos, específicamente en partes intervinientes con el quemador a reconvertir.

3.4.1.1 MODIFICACIÓN MECÁNICA

La modificación mecánica consiste en colocar la chaqueta de inyección de gas natural en el cañón del quemador, colocar el tren de válvulas e interconectar con la chaqueta de inyección y la Estación de Regulación Secundaria, instalar el varillaje de modulación que consiste en interconexión mecánica de la válvula mariposa, dámper de aire y el motor modutrol; cambio de la línea de piloto de encendido, instalación del cono refractario y reubicación de la fotocelda (Ver Figura N° 3.16).

Figura N° 3.16. Cañon, agujeros de inyección y cono refractario.



3.4.1.2 MODIFICACIÓN ELÉCTRICA

El programador instalado (RM 7840L Honeywell) y la fotocelda (C7027A) pueden operar con combustibles líquidos y gaseosos; por lo tanto, sólo será necesario un recableado en el tablero y el tren de válvulas como sigue:

- a. Se colocará un interruptor de dos posiciones que permita la selección del combustible a operar de forma tal si se elige operar con gas natural jamás operará con petróleo industrial y viceversa.
- b. El interruptor de encendido será el mismo para el arranque con ambos combustibles.
- c. Se cableará el tren de válvulas desde el tablero, así como, el piloto de encendido.

3.4.2 EJECUCIÓN

Después de los cálculos de la chaqueta de inyección de gas, tren de válvulas, recálculo térmico y Estación de Regulación Secundaria, se pasa a realizar los planos que se indican en el ítem 3.4.2.1, luego se fabrican los componentes en taller para luego realizar los trabajos de instalación en campo, que son los siguientes:

- a. Realizar un mantenimiento general a la caldera, que consiste principalmente en el deshollinado (limpieza interna del lado de gases), lavado interno con agua a presión por el lado del agua.
- b. Realizar una inspección visual por el lado del agua, esta inspección permite evaluar la corrosión y principalmente cuantificar el espesor de las incrustaciones en la placa posterior, hogar y tubos de fuego. Estas incrustaciones según el espesor acumulado son muy perjudiciales. Por ejemplo, 1mm de espesor produce una caída del 8% de la eficiencia térmica de la caldera y adicionalmente actúa como un aislante térmico que genera un sobrecalentamiento de la placa posterior, bordes de los tubos y el hogar, ocasionando el envejecimiento prematuro y fisura de los mismos. El sobrecalentamiento se incrementará con el uso del gas natural debido a que la temperatura de gases a la salida del hogar tiende a incrementarse respecto a cuando operaba con petróleo industrial N° 6, por lo tanto, la caldera deberá estar libre de incrustaciones.
- c. Desmontaje e instalación del nuevo cono refractario.
- d. Montaje e instalación de la chaqueta de inyección.
- e. Instalación y montaje del Tren de válvulas.
- f. Instalación y montaje del la Estación de Regulación Secundaria.

- g. Conexión de la Estación de Regulación Secundaria con el Tren de válvulas.
- h. Recableado eléctrico del tablero y Tren de válvulas.
- i. Montaje de las válvulas de modulación, válvula mariposa de gas y dámper del aire.
- j. Pruebas neumáticas.
- k. Preparación del expediente técnico para aprobación por empresas certificadoras y la empresa distribuidora de gas natural (Calidda).
- l. Regulación de la Estación Reguladora Secundaria.

El equipo queda listo para las pruebas de operación, ver Figuras N° 3.17, 3.18 y 3.19

Figura N° 3.17 Caldera reconvertida a gas natural

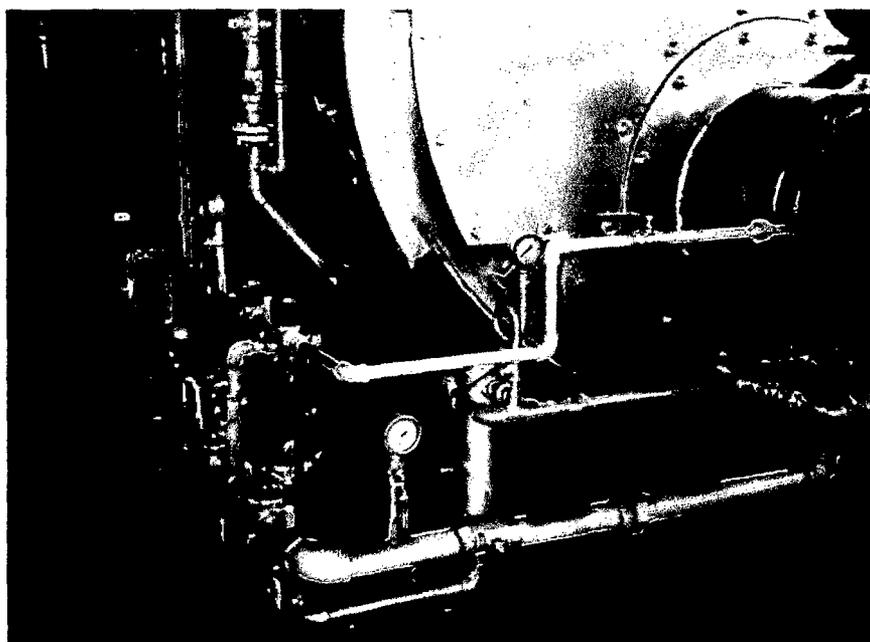


Figura N° 3.18 Quemador convertido mixto

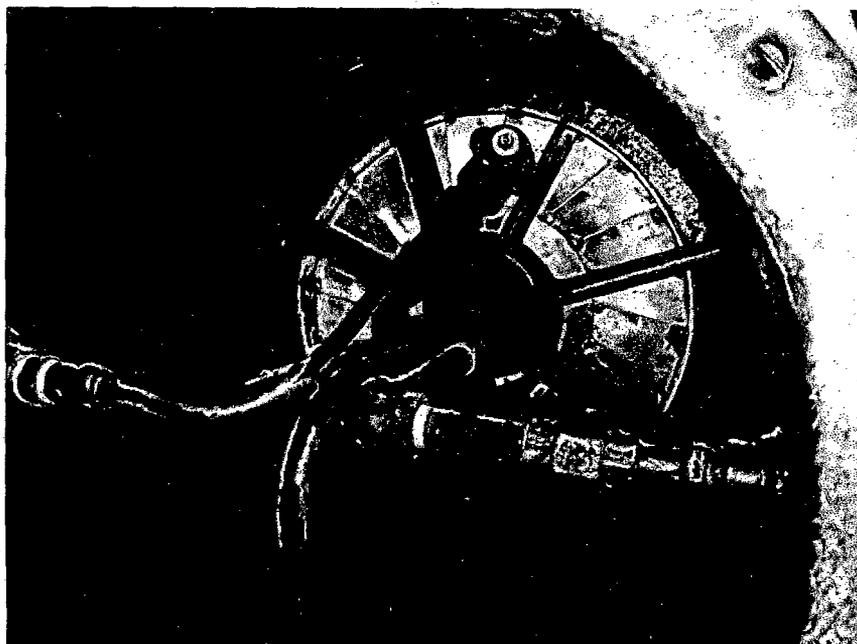
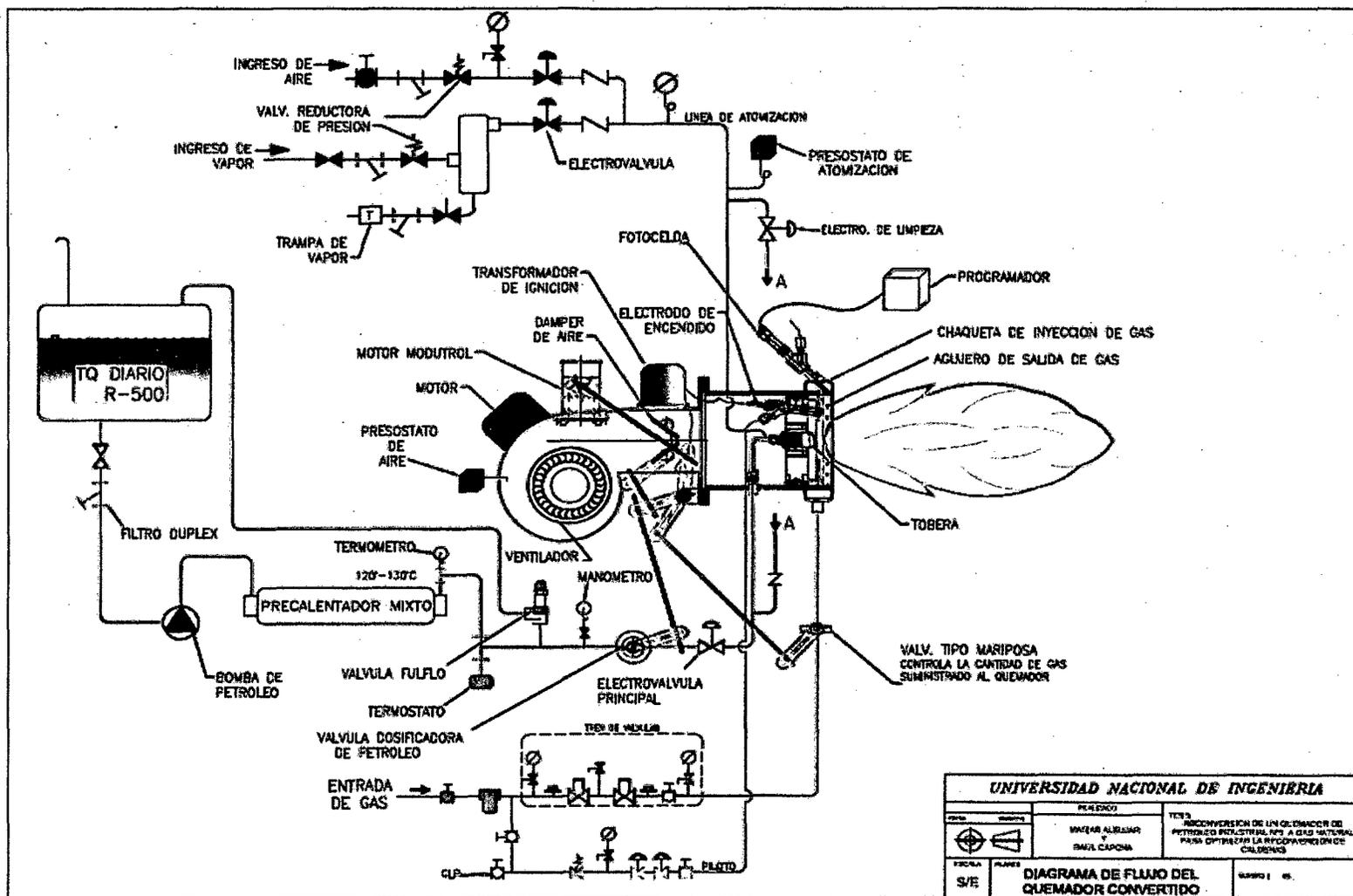


Figura N° 3.19 Diagrama de Flujo del Quemador convertido



3.4.2.1 Lista de partes del quemador mixto

Tabla N° 3.13 Partes del Quemador mixto reconvertido

Ítem	Cant.	Descripción	Marca
1	1	Tobera Monarch de 60 GPH por 60°	Monarch
2	1	Difusor de Acero Inoxidable 353 diámetro.	Etepsa
3	1	Difusor de Fe. Ne. 353 diámetros.	Etepsa
4	1	Motor eléctrico de 7.5 HP X 3520 RPM	Delcrosa
5	1	Ventilador de 9 15/16 x 5" de giro horario mirando desde el motor.	Etepsa
6	2	Paletas de regulación de aire	Etepsa
7	1	Válvula solenoide 1/2" diámetro - BOB 120 V-NC - para petróleo Bunker	Mac. ASCO
8	1	Piloto de encendido	Etepsa
9	1	Transformador de ignición de 120 V – 6.000 V.	Webster
10	1	Válvula solenoide diámetro. 3/8"NPT, bobina 120 V. 0-50 PSI - NC.	Marca Skinner
11	1	Manómetro de 0-100 PSI dial 2 1/2"	WIKA
12	1	Válvula reguladora de caudal 3/8"	Hauck
13	1	Válvula solenoide principal de 1/2" BOB 120V -NC, para r-500, tipo F 661592	Marca Asco
14	1	Válvula Fulflo de 1/2", modelo: WS	Fulflo
15	1	Manómetro de 0-300 PSI dial 2 1/2"	Wika
16	1	Termómetro de 0-300°C dial 3", bulbo 4" conexión 1/2"NPT	----
17	1	Bomba de petróleo modelo 2 AM02	Roper
18	1	Válvula mariposa para gas de 2 "	EQA

19	1	filtro para gas de 2 " con malla de 50 micras	EQA
20	1	Válvula solenoide Jefferson modelo 2030LA16L de 2" Ø NPT volt. 120V - NC. De apertura lenta	----
21	2	Válvulas Solenoide "Jefferson" mod. 1330LA04, 1/2"npt, 120V.	----
22	1	Válvula solenoide Jefferson modelo 2030LA16-I con Swicht microcontacto de prueba de válvula cerrada, de 2" Ø npt, volt. 120V, NC. De apertura lenta	---
23	1	Válvulas Solenoide "Jefferson" mod. 1330LA06 NA, 3/4"npt, 120V.	----
24	1	Interruptor de presión C6097B 12-60 pulg.agua	Honeywell
25	1	Interruptor de presión C6097A 12-60 pulg.agua	Honeywell
26	2	Válvulas tipo esféricas de 2" por 1000 WOG paso total	----
27	2	Válvulas tipo esféricas de 1/2" por 1000 WOG paso normal	----
28	1	Válvula globo tipo aguja de 1/2" por 150 psi	----
29	3	Manómetros de 0-300 mbar dial de 2 1/2"	----
30	3	Válvulas tipo aguja o bola de 1/4" por 600 psi	----

Adicionalmente a las partes indicadas en la Tabla N° 3.13, se considera las partes de control indicadas en la Tabla N° 3.6 que abarcan las partes de control de combustión y panel de control.

3.4.3 OPERACIÓN Y TOMA DE DATOS

Después de realizado los trabajos de instalación se procede al arranque y regulación con el nuevo combustible, según los siguientes pasos:

- a. Con la válvula de bloqueo del tren de válvulas y la válvula de bloqueo del piloto cerrados, se procede a regular la Estación de Regulación Secundaria a 82 mbar.
- b. En vacío con las válvulas cerradas se realiza la secuencia de arranque del quemador a fin de verificar la correcta operación del programador y cableado eléctrico.
- c. En vacío se procede a regular y sincronizar la apertura de la válvula mariposa y el dámper de aire.
- d. Se abre la válvula de bloqueo del piloto de encendido y se realiza la secuencia de arranque, se verifica el correcto encendido del piloto y se regula la presión del gas en el piloto.
- e. Se enciende solamente el piloto de 3 a 4 veces con el fin de probar su correcta regulación.
- f. Se abre la válvula de bloqueo del tren de válvulas y se procede al arranque con gas natural.
- g. Se regula la combustión en llama chica.
- h. Se regula la combustión en llama media.
- i. Se regula la combustión en llama grande

Finalmente, el equipo queda operando y listo para la toma de medidas de los parámetros de operación y eficiencia.

3.4.4 TOMA DE MEDIDAS Y RECÁLCULO DE LA EFICIENCIA

DESPUÉS DE LA CONVERSIÓN

La medición de la eficiencia térmica se realiza con la caldera en marcha y usaremos los analizadores TESTO, en sus dos modelos, T325XL y el T346. El analizador de gases marca TESTO T325XL mide usando como base el poder calorífico superior y el T346 usa como base el poder calorífico inferior. Como sabemos la eficiencia térmica sólo tiene en cuenta las pérdidas de calor por gases secos, pérdidas de calor en la entalpía del vapor de agua e inquemados sólidos y gaseosos.

En la Tabla N° 3.14 se presenta los parámetros operativos del sistema.

Tabla N° 3.14 Parámetros operativos

Ítem	Parámetro	Valor	Unid
1	Presión antes de la ERMP	4,2	Bar
3	Presión después de la ERMP	80	mbar
4	Presión antes del Tren de válvulas	70	mbar
5	Presión de vapor de la caldera	8,62	Bar
6	Voltaje de señal de llama (de 0 a 5V)	5	V

En la Tabla N° 3.15 se presenta las mediciones realizadas con el equipo TESTO T325XL el 19 de abril del 2010 y en la Tabla N° 3.16 se presenta las mediciones realizadas con el equipo TESTO T346 el 05 de Noviembre del 2010.

**Tabla N° 3.15 Primera medición de pérdidas de gases de combustión y
Eficiencia en base al PCS**

Símbolos	Unidades	Tipo de llama	
		Baja	Alta
FT	°C	155,4	173,4
O2	%	4,3	4,3
CO	Ppm	13	0
EFF	%	85,5	84,8
CO2	%	9,3	9,3
EX/A	%	23	22,7
AT	°C	22	22

Leyenda:

FT: temperatura de Gases; EFF: eficiencia térmica; EX/A: exceso de aire; AT: temperatura ambiente.

**Tabla N° 3.16 Segunda medición de pérdidas de gases de combustión y
Eficiencia en base al PCI**

Símbolos	Unidades	Tipo de llama		
		Baja	Media	Alta
FT	°C	126,5	197,5	204,1
O2	%	5	2,5	2,9
EFF	%	94,6	91,9	91,5
CO2	%	9,1	10,5	10,3
EX/A	%	31	14	16
AT	°C	21,3	21,3	21,3

Leyenda:

FT: temperatura de Gases; EFF: eficiencia térmica; EX/A: exceso de aire; AT: temperatura ambiente.

La Tabla N° 3.15 muestra la eficiencia térmica en base al PCS, podemos observar que la eficiencia térmica promedio es de 85,15%, entonces la eficiencia de la caldera será, la eficiencia térmica menos las pérdidas por radiación, convección y otros, estimados en 2,5%. Por lo tanto la eficiencia será:

$$\eta = (85,15 - 2,5)\% = 82,65\%, \text{ (medición en base al PCS)}$$

En la Tabla N° 3.16 muestra la eficiencia térmica en base al PCI, podemos observar que la eficiencia térmica promedio es 92,666% del cual podríamos recalcular la eficiencia térmica en base al PCS. La eficiencia térmica en base al PCS será:

$$\eta_t = 92,66 \times \text{PCI/PCS} = 92,66 \times 11.605/12.847 = 83,7\%$$

Luego, descontando las pérdidas por radiación, convección y otros, estimados en 2,5%, la eficiencia de la caldera en base al PCS será.

$$\eta = 83,7\% - 2,5\% = 81,2\%. \text{ (de la medición en base al PCS)}$$

Por lo tanto, promediando la eficiencia medida con ambos instrumentos, la eficiencia de la caldera en base al PCS con gas natural será:

$\eta = (82,65\% + 81,2\%) / 2 = 81,925\%$, que podríamos considerar para fines prácticos igual, a la eficiencia estimado en el recálculo térmico (81,91%).

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica considera la comparación de la implementación de la conversión del quemador de petróleo industrial N° 6 para uso de gas natural contra el reemplazo simple del quemador mixto. Se presenta una descripción detallada del consumo de combustible, costos de operación y mantenimiento, costos de los equipos, costo de materiales y costos de mano de obra. Luego se realiza la evaluación económica en base a los ahorros, los diagramas de flujo de caja y los indicadores económicos del Valor Actual Neto (VAN) en base a una tasa de descuento del 12% y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

4.1 COSTOS

4.1.1 CONSUMO Y PRECIO DE COMBUSTIBLE

Considerando una operación diaria de dos turnos, con turnos de 8 horas, conocido el consumo de gas natural por hora y considerando un mes de trabajo de 26 días, se tiene que el consumo de gas natural al mes es de 88.832,64 Sm³/mes ó en energía 3.400,3 MBTU/mes (Ver Tabla N° 4.1).

Tabla N° 4.1 Consumo de combustible

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Consumo GN por hora	Sm ³ /hr	213,54
2	PCS de Gas Natural	kcal /Sm ³	9.652
5	Consumo GN al mes	Sm ³ /mes	88.832,64
6	Factor conversión	BTU/Kcal	0,252
7	Consumo combustible	MBTU/mes	3.400,3

De las tarifas establecidas para los consumidores de gas natural según el consumo de las industrias, se tiene que para un consumo de 88.832,64 Sm³/mes le corresponde la categoría C. En la Tabla N° 4.2 se presenta las tarifas para el petróleo industrial N° 6 y para el gas natural.

Tabla N° 4.2 Precio del Petróleo Industrial N° 6 y del Gas natural

Combustible	Precio (US\$/MBTU)
Petróleo Industrial N°6	15
Gas Natural (Cat. C)	5

4.1.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La sustitución del combustible petróleo industrial N° 6 por gas natural presenta ahorros en la operación diaria y en el mantenimiento de la caldera, ver las Tablas N° 4.3 y 4.4.

Tabla N° 4.3 Costos de operación y mantenimiento de caldera con petróleo industrial N° 6

Ítem	Descripción	Cant	Unid	US\$	Total (año)	Total (mes)
1	Operación	12	Glob	1.000	12.000	1.000
2	Mantenimiento anual	1	Unid	1.000	1.000	83,33
3	Mantenimiento Semestral	1	Unid	600	600	50,00
4	Mantenimiento Trimestral	2	Unid	450	900	75,00
5	Mantenimiento mensual	9	Unid	150	1.350	112,50
Total					15.850	1.320,83

Tabla N° 4.4 Costos de operación y mantenimiento de caldera con gas natural

Ítem	Descripción	Cant	Unid	US\$	Total	Total (mes)
1	Operación	1	Glob	200	2.400	200
2	Mantenimiento anual	1	Unid	900	900	75
3	Mantenimiento Semestral	0	Unid	600	0	0
4	Mantenimiento Trimestral	3	Unid	300	900	75
5	Mantenimiento mensual	0	Unid	150	0	0
TOTAL					4.200	350

De las Tablas N° 4.3 y 4.4 se aprecia que el ahorro por costos de operación y mantenimiento al usar el gas natural con respecto al petróleo industrial N° 6 representa un ahorro de más del 350%, disminuyendo de US\$1.320 a US\$350 de costo mensual.

4.2 EVALUACIÓN DE OPCIONES

La evaluación económica del presenta trabajo considera la comparación de las inversiones y ahorros asociados de la compra de la compra de un quemador nuevo y la conversión del quemador existente al uso del gas natural. Los indicadores económicos que permiten determinar la factibilidad económica son el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno.

4.2.1 OPCIÓN I - QUEMADOR NUEVO

Tabla N° 4.5 Inversión y ahorro para Quemador de gas natural nuevo

Ítem	Descripción	Quemador nuevo	Observación
1	Inversión inicial (US\$)	76.438,57	
1.1	Acometida	5.500	
1.2	Estación de Regulación y Medición	12.572	Cot. N° TP 1094 – A
1.3	Red Interna	20.000	
1.4	Estación y Regulación Secundaria	2.500	
1.5	Quemador nuevo	29.241,6	Cot. N° 11654
1.6	Costo de materiales	1.535	
1.7	Costo de mano de obra (US\$)	1.090	
1.8	Obras civiles	4.000	
2	Ahorro Total con quemador nuevo (US\$)	34.973,55	
2.1	Ahorro por cambio de combustible	34.002,72	
2.2	Ahorro por costos de operación	800	
2.3	Ahorro por costos de mantenimiento	170,83	

Diagrama de Flujos de caja con quemador nuevo:

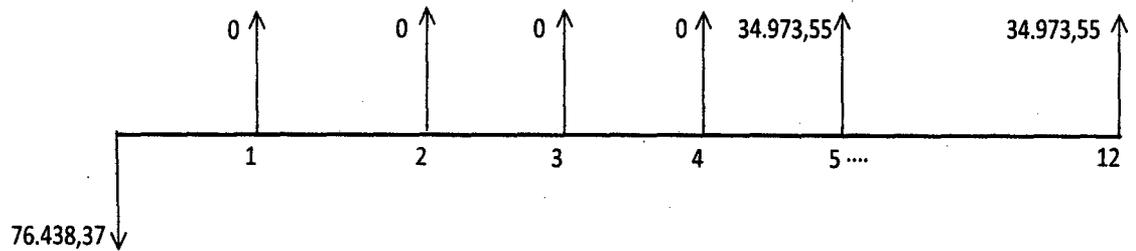


Tabla N° 4.6 Flujo de caja con quemador nuevo

INVERSIÓN	0	76.438,57
AHORRO (mes)	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
	5	34.973,55
	6	34.973,55
	7	34.973,55
	8	34.973,55
	9	34.973,55
	10	34.973,55
	11	34.973,55
	12	34.973,55
VAN (US\$)		178.936,69
TIR		17,4%

4.2.2 OPCIÓN II – CONVERSIÓN DE QUEMADOR

Tabla N° 4.7 Inversión y ahorro para conversión del quemador

Ítem	Descripción	Conversión del quemador	Observación
1	Inversión inicial (US\$)	53.507	
1.1	Acometida	5.500	Cot. N° TP 1094 – A
1.2	Estación de Regulación y Medición	12.572	
1.3	Red Interna	20.000	
1.4	Estación y Regulación Secundaria	2.500	
1.5	Conversión del quemador + Utilidad	5.800	
1.6	Costo de materiales	1.685	
1.7	Costo de mano de obra (US\$)	1.450	
1.8	Obras civiles	4.000	
2	Ahorro Total (US\$)	34.973,55	
2.1	Ahorro por cambio de combustible	34.002,7	
2.2	Ahorro por costos de operación	800	
2.3	Ahorro por costos de mantenimiento	170,83	

Diagrama de Flujo de conversión del quemador:

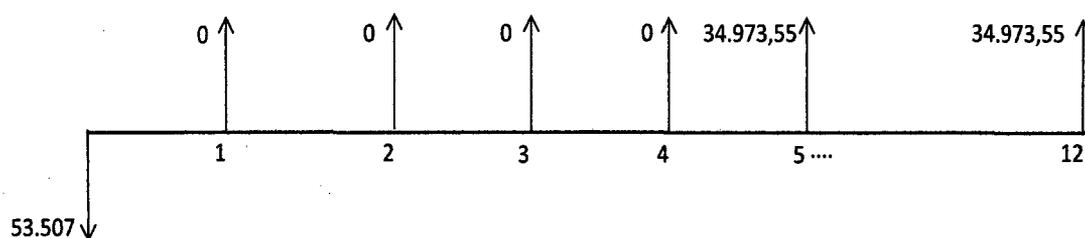


Tabla N° 4.8 Flujo de caja con Conversión de quemador

INVERSION	0	-53.507
AHORRO	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
	5	34.973,55
	6	34.973,55
	7	34.973,55
	8	34.973,55
	9	34.973,55
	10	34.973,55
	11	34.973,55
	12	34.973,55
VAN (US\$)		201.641,02
TIR		23,1%

En la Tabla N° 4.9 se presenta el resumen de los indicadores económicos de los dos casos analizados, de donde se observa que el VAN y la TIR del caso de conversión son mayores al VAN y la TIR del caso de sustitución del quemador, confirmándose así la factibilidad económica de la conversión del quemador.

Tabla N° 4.9 Indicadores económicos

Indicador	Quemador nuevo	Conversión del quemador
Valor actual Neto (US\$)	178.936,69	201.641,02
TIR (%)	17,4%	23,1%

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La eficiencia obtenida de la caldera después de la reconversión para el caso en estudio es de 81,925%, valor que se encuentra dentro del rango aceptado internacionalmente, tal es así que la marca mundialmente conocida Cleaver Brooks indica el siguiente rango de eficiencias: 81,7% - 82,2% (ver Tabla N° 5.1), por lo tanto, esto demuestra que la conversión del quemador es técnicamente viable, y es una alternativa interesante a tener en cuenta cuando se realicen la reconversión de calderas a gas natural.

Tabla N° 5.1 Eficiencias (%) de calderas modelo CBR a gas natural

BHP	OPERATING PRESSURE = 10 psig				OPERATING PRESSURE = 125 psig			
	% OF LOAD				% OF LOAD			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
125	84,4	84,5	84,0	83,4	81,6	81,8	81,5	81,0
150	84,3	84,4	83,7	83,0	81,5	81,6	81,2	80,7
200	84,5	84,9	84,5	84,1	81,7	82,2	82,0	81,7
250	84,2	84,2	83,5	82,6	81,4	81,5	80,9	80,3
300	84,4	84,5	84,0	83,4	81,5	81,8	81,5	81,0
350	84,6	85,1	84,8	84,5	81,8	82,4	82,3	82,1
400	84,8	84,3	83,6	82,7	82,0	81,8	81,1	80,4
500	84,7	84,2	83,4	82,5	82,0	81,7	81,0	80,1
600	85,0	84,8	84,4	83,8	82,3	82,3	81,9	81,4
700	85,3	85,3	85,1	84,8	82,6	82,8	82,7	82,4
800	85,2	85,3	85,0	84,6	82,5	82,7	82,6	82,3

Fuente: Cleaver Brooks 2005, *The boiler book*, USA. Manual de especificaciones técnicas, Sección A10, Modelo CBR 2 pasos.

En cuanto a la reducción de costos vemos claramente que la inversión para la reconversión de la caldera cuando se opta por la conversión del quemador es de US\$ 53.507, contra US\$ 76.438,57 con quemador nuevo; por lo tanto, el ahorro de la inversión es del 30%. Así también el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para el caso de la conversión son de US\$ 201.641,02 y 23,1% respectivamente y el VAN y la TIR para la sustitución del quemador es de US\$ 178.936,69 y 17,4% respectivamente. Por lo tanto se demuestra que la conversión del quemador es la mejor opción.

La Tabla N° 5.2 presenta la contrastación de las hipótesis planteadas

Tabla N° 5.2 Contrastación de Hipótesis

HIPOTESIS	RESULTADOS
<p>Hipótesis general:</p> <p>El análisis de la conversión del quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural permite reducir costos de la reconversión de caldera de la empresa Vopak Serlipsa en la Provincia Constitucional del Callao.</p>	<p>El análisis de la conversión del quemador de petróleo industrial N° 6 a gas natural si permite reducir costos de la reconversión.</p> <p>Para el caso en estudio se tiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Costo con quemador nuevo: US\$ 76.438,37 - Costo con quemador reconvertido: US\$ 53.507 - Porcentaje de Ahorro: 30% <p>Por lo tanto la hipótesis es afirmativa.</p>

<p>Hipótesis Específica 1:</p> <p>Es posible realizar la modificación electromecánica del quemador de petróleo industrial N° 6 para su uso con gas natural.</p>	<p>Según el análisis presentado, la modificación realizada y las pruebas operativas realizadas, la hipótesis es afirmativa.</p>
<p>Hipótesis Específica 2:</p> <p>La eficiencia de la caldera con quemador convertido es similar a la eficiencia de la caldera que opera con quemador nuevo.</p>	<p>La eficiencia obtenida de la caldera después de la reconversión es de 81,925%, y la eficiencia promedio de calderas con quemador a gas natural esta en el siguiente rango: 81,7% - 82,2%. Por lo tanto la hipótesis es afirmativa.</p>

CONCLUSIONES

1. En el análisis del requerimiento del aire de combustión tanto con el petróleo industrial N°6 y el gas natural se ha llegado a la conclusión que el requerimiento de aire real, en el caso del petróleo es 6,15% mayor al del gas natural. Por lo tanto el ventilador existente cumple con creces con el nuevo requerimiento del aire de combustión con gas natural y no requiere ninguna modificación.
2. Del análisis de la cantidad de gases de combustión generados con gas natural y petróleo industrial N° 6 se concluye que la cantidad de gases producidos con gas natural en condiciones reales de operación es 2,44% menor a los producidos con petróleo industrial N° 6. Por lo tanto el área de flujo, de los tubos de humo, ductos de evacuación y chimenea no requieren ninguna modificación para operar correctamente con gas natural.
3. En la evaluación de las dimensiones del hogar, se observa que el diámetro y la longitud del hogar es mayor al diámetro y longitud de llama en 2.9% y 41% respectivamente; por lo tanto, el hogar tiene las dimensiones adecuadas para una correcta generación de llama con gas natural a plena potencia. Cabe indicar que el diámetro y la longitud de llama con gas natural es menor al del petróleo industrial N° 6 en 5.3% y 9.6% respectivamente.

4. La eficiencia de la caldera medida en base al poder calorífico superior operando con petróleo industrial N°6 son: 85,66% inmediatamente después de un proceso de deshollinado, y 82,63% en proceso de operación. Con gas natural después de la reconversión se obtiene una eficiencia de 81,925%, medidos en base al poder calorífico superior.
5. Si bien es cierto que la eficiencia con petróleo cuando la caldera está limpia es mayor en 3,735% al de la eficiencia con gas natural, también es cierto que esta diferencia tiende a disminuir, con el transcurrir del tiempo ya que operando con petróleo los tubos de humo y el hogar se van hollinando, mientras que la eficiencia con gas natural se mantiene constante a lo largo del tiempo de operación.
6. De los análisis económicos se concluye que la conversión de los quemadores para calderas industriales impacta favorablemente en la viabilidad económica, la inversión se reduce en 30%, el Valor Actual Neto para el caso de estudio es de USS 201.641,02 y la Tasa Interna de Retorno de 23,1%.

RECOMENDACIONES

1. En la reconversión de las calderas que operan con petróleo diesel 2, que normalmente tienen quemadores con potencias menores o iguales de 1.500.000,00 kcal/h, se recomienda realizar la sustitución del quemador.
2. En la reconversión de las calderas que operan con gas licuado de petróleo, se recomienda reconvertir o regular el quemador para que opere con gas natural, en este caso no es necesario la sustitución del quemador salvo por antigüedad.
3. En reconversión de las calderas que operan con petróleos Industriales, que normalmente tienen quemadores con potencias mayores o iguales de 1.500.000,00 kcal/h, se recomienda evaluar la mejor alternativa entre la conversión y sustitución del quemador.
4. En la conversión del quemador se recomienda dejarlo como un quemador mixto gas natural-diesel 2, la instalación con petróleo diesel 2 no sería ningún gasto, bastará con desconectar el sistema de calentamiento a la instalación existente.
5. En la reconversión de las calderas si se opta por la sustitución del quemador, se recomienda evaluar el tamaño del hogar versus del tamaño de llama del nuevo quemador. Esto no será necesario cuando se realiza la conversión del

quemador ya que el tamaño de llama producido por el gas natural siempre es menor al producido con el petróleo industrial.

6. En la reconversión de las calderas se recomienda inspeccionar y garantizar que las paredes en el lado del agua, de los tubos de humos y placa porta tubos estén totalmente libres de incrustaciones. Para evitar el sobrecalentamiento del metal en contacto con los gases de combustión ya que se espera un ligero incremento de temperatura de gases.

BIBLIOGRAFÍA

1. Annaratone, D., Berlin, V., Springer 2008, *Steam Generators Descriptions and Design*, Edición I.
2. American Society of Mechanical Engineers 2004, *Section VII: Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers*, USA.
3. Asociación Española de Gas - SEDIGAS, 2010, *Especificaciones técnicas para la realización de pruebas previas, puesta en servicio, inspección periódica y adecuación de aparatos de gas*, revisado el 10 noviembre del 2010 de
http://www.sedigas.es/php/download.php?f=paginas/89/archivos/187/doc/es/rev0_tema1_generalidades_sobre_el_gas.pdf.
4. Becco, L. 1985, *Los G.L.P.*, Editorial Butano S.A. Madrid, España.
5. Calidda Gas Natural de Lima y Callao 2010, *Distribución de gas natural en Lima y Callao*. Recuperado el 10 de octubre del 2010
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Hidrocarburos/estadistica%202010/Setiembre/Setiembre%20202/Distribucion%20de%20Gas%20Natural%20de%20Lima%20y%20Callao.pdf>.
6. Cleaver Brooks 2005, *The boiler book*, USA.
7. Combustibles y su combustión 1983, *Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía*, Editorial Centro de Estudios de La energía, España.
8. Combustion Handbook 2001, Editorial North American. Tercera Edición. USA.

9. Combustión. 2010, Universitat de Jaume I- Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, recuperado 15 de Junio del 2010
<<http://www.emc.uji.es/asignatura/obtener.php?letra=3&codigo=59&fichero=10778115103>>.
10. Curso Tecnología del Calor, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica Nacional Argentina, recuperado el 30 de Noviembre del 2010 de
<<http://www.frlp.utn.edu.ar/mecanica/Materias/TecnologiadelCalor/novedades/APUNTES/Intercambiadores1.doc>>.
11. De Andres, J., Pomatta, R., Aroca, S. y García, M 1997, *Instalaciones de Combustibles Gaseosos*, Ediciones: A. Madrid Vicente, Madrid, España.
12. *Engineering Guide Combustion*, 1986, Eclipse, Inc. 1665 Elmwood Rd Illinois USA.
13. Latre, F., *Diseño de Calderas Pirotubulares*, Depósito legal nº Z-2355-2005, España, recuperado 10 de enero del 2009,
<<http://www.tecnologiacalderas.com>>.
14. Ganapathy, V 2003, "*Industrial Boilers and heat Recovery Steam Generators*" *Design Applications and calculations*, Editorial: Marcel Dekker Inc, Texas, USA.
15. García, R 2001, Combustión y Combustibles, Sistema Nacional de Información de la Energía, Cuba, recuperado el 20 de Octubre del 2010,
<<http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF>>.

16. Generación de Vapor 1983, Manuales Técnicos y de Instrucción Para Conservación de Energía, Editorial Centro de Estudios de La energía. Madrid, España.
17. Lawrence, A 2000, *Manual de Calderas*. Volúmenes 1 y 2. 4ta. Edición. Editorial McGraw Hill. Madrid. España.
18. Márquez, M 2005, *Combustión y Quemadores*, Editorial Marcombo, España.
19. Ministerio de Energía y Minas del Perú 2008, *Balance Nacional de Energía*, recuperado el 10 de Setiembre del 2010, <<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Hidrocarburos/balances/BN E2008.pdf>>.
20. Ministerio de Energía y Minas del Perú, Balanza comercial setiembre 2010, recuperado el 10 de setiembre del 2010 <<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Hidrocarburos/estadistica%202010/Setiembr/Setiembre%2020/Balanza%20Comercial%20Setiembre.pdf>>
21. Ministerio de la producción de Perú & Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ) de Alemania 2002, *Estudio de factibilidad para un Proyecto MDL - Mejora de la Eficiencia Energética en Calderas Industriales en el Perú*, Lima, Perú.
22. Miranda, A., Pujol, O 1994, *Biblioteca del Instalador de gas, conocimientos Fundamentales*, 1era ed, Ceac, Barcelona.
23. Miranda, S 2002, *Curso de Química Industrial II: Combustión*, Facultad De Ingeniería de la Universidad de los Andes, recuperado 22 de Junio del 2007, <<http://www.scribd.com/doc/51163353/I-COMBUSTION>>.

24. Norma Argentina 1985, *Disposiciones, Normas y recomendaciones para uso de gas natural*, NAG 201, Buenos Aires, Argentina.
25. Norma Técnica Peruana 2003, *Gas natural seco. Sistema de Tuberías para instalaciones Internas Industriales*, NTP 111.010, Lima, Perú.
26. Norma Técnica Peruana 2002, *Calderas industriales. Procedimiento para la determinación de Eficiencia térmica de las Calderas Industriales*, NTP 350.300, Lima, Perú.
27. Norma Española 1997, *Quemadores Automáticos de aire Forzado que utilizan combustibles gaseosos*. UNE-EN 676, España.
28. Rojas, F 2005, *Ingeniería de Combustibles Gaseosos*, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica Del Perú.
29. Selmec Equipos Industriales, 1997, *Manual Selmec de Calderas Industriales*, 1997, México.
30. Tecnología de la combustión, 2008, Universidad de Valladolid. España.
Recuperado el 1 de Junio del 2010.
<http://www.uva.es/consultas/guia.php?menu=completo&ano_academico=0607&codigo_plan=210&codigo_asignatura=16052&grupo=1>.
31. TESTO. Tecnología de la Medición en Calderas. Tercera Edición. Barcelona. España.

ANEXOS

ANEXO A
TREN DE VÁLVULAS

Trenes de Valvulas de Gas Recomendados

HOJA DE CODIGOS

Esta guía tiene intención de servir únicamente como referencia a los trenes de válvulas de gas requeridos/recomendados por las agencias aprobatorias, corporaciones de códigos y aseguradoras. Los trenes de gas ilustrados en las figuras 1 a 6 satisfacen y algunas veces exceden los requerimientos mínimos de cualquier organización. Los requerimientos/recomendaciones ilustrados son actuales a la fecha de publicación.

1. Seleccione (de la lista siguiente) la agencia aprobatoria, corporación técnica o asegurador cuyos requerimientos/recomendaciones necesitan ser cumplidas.
2. Seleccione el rango de entrada apropiado (piloto, principal) para el quemador.
3. Nótese que el número que sigue al rango de entrada indica en número de la figura que ilustra los componentes y tubería típicos para el rango en particular.

ÍNDICE < = menor que; > = mayor que

ANSI Z83.3 Equipo que Utiliza Gas en Calderas Grandes.		Risk Mutual Mejorado	
400,000-2,500,000 Btu/h	Fig. 6	Piloto <250,000 Btu/h, principal	
2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig. 4	<1,000,000 Btu/h	Fig. 3
5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig. 5	Piloto <250,000 Btu/h, principal	
		>1,000,000 Btu/h	Fig. 2
		Piloto >250,000 Btu/h, principal	
		>1,000,000 Btu/h	Fig. 1
ASME CSSD-1: Dispositivos de Control y Seguridad para Calderas Encendidas Automáticamente.		Grupo Kemper	
400,000-2,500,000 Btu/h	Fig. 3	1,000,000-10,000,000 Btu/h	Fig. 2
2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig. 4	>10,000,000 Btu/h	Fig. 1
5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig. 5		
ANSI Z21.13 Calderas Encendido por Gas, de Vapor de Baja Presión y de Agua Caliente.		NFPA 8501: Operación de un sólo Quemador para Caldera	
<400,000 Btu/h	Fig. 3	>12,500,000 Btu/h	Fig. 1
400,000-2,500,000 Btu/h	Fig. 3		
2,500,000-12,500,000 Btu/h	Fig. 3/5	UL 795: Equipo para Calefacción con gas para Aplicaciones Comerciales e Industriales	
Sistemas Factory Mutual: 6-4, 6-4R; Quemadores Sensillos para Calderas Alimentados por Combustible y Gas.		<2,500,000 Btu/h	Fig. 4
400,000-2,500,000 Btu/h	Fig. 4	2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig. 4
2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig. 4	5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig. 5
5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig. 5	>12,500,000 Btu/h	Fig. 2
>12,500,000 Btu/h	Fig. 1	Servicios Aprobatorios Internacionales (CGA/AGA)	
Aseguradores de Industrial Risk (IRI)		CGA-3.1: Grupo de Calderas de Paquete Industriales y Comerciales Alimentadas por Gas.	
>400,000 Btu/h	Fig. 1	CGA-3.2: Grupo de Calderas de Paquete Industriales y Comerciales Alimentadas por Gas.	
		CGA-3.3: Calderas industriales y Comerciales Diseñadas para Gas, Alimentadas Atmosféricamente, con Chimenea Vertical.	

NOTA: Los componentes de tren de gas, su funcionalidad y disposiciones de la tubería requeridos por estos estándares varían dependiendo de la presión del gas (inmediatamente aguas abajo del regulador de presión). Consulte los estándares individuales para información específica.



TRENES DE VALVULAS DE GAS RECOMENDADOS

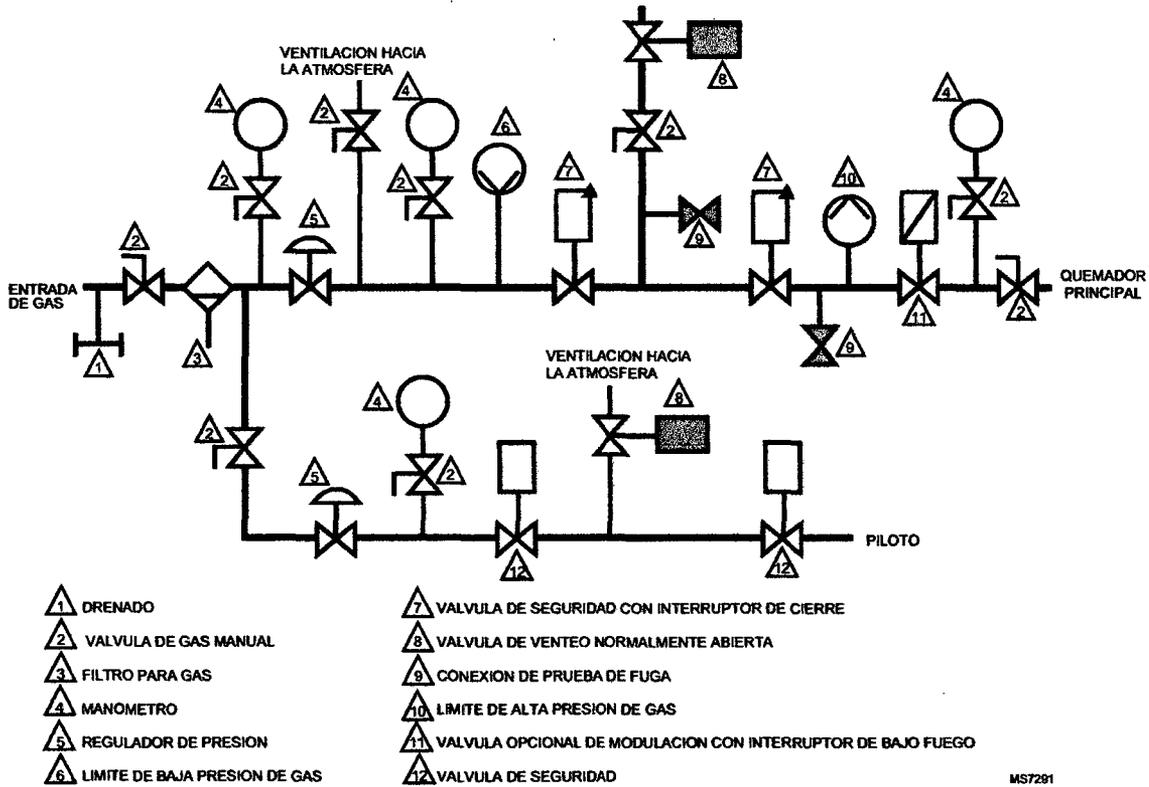


Fig. 1.

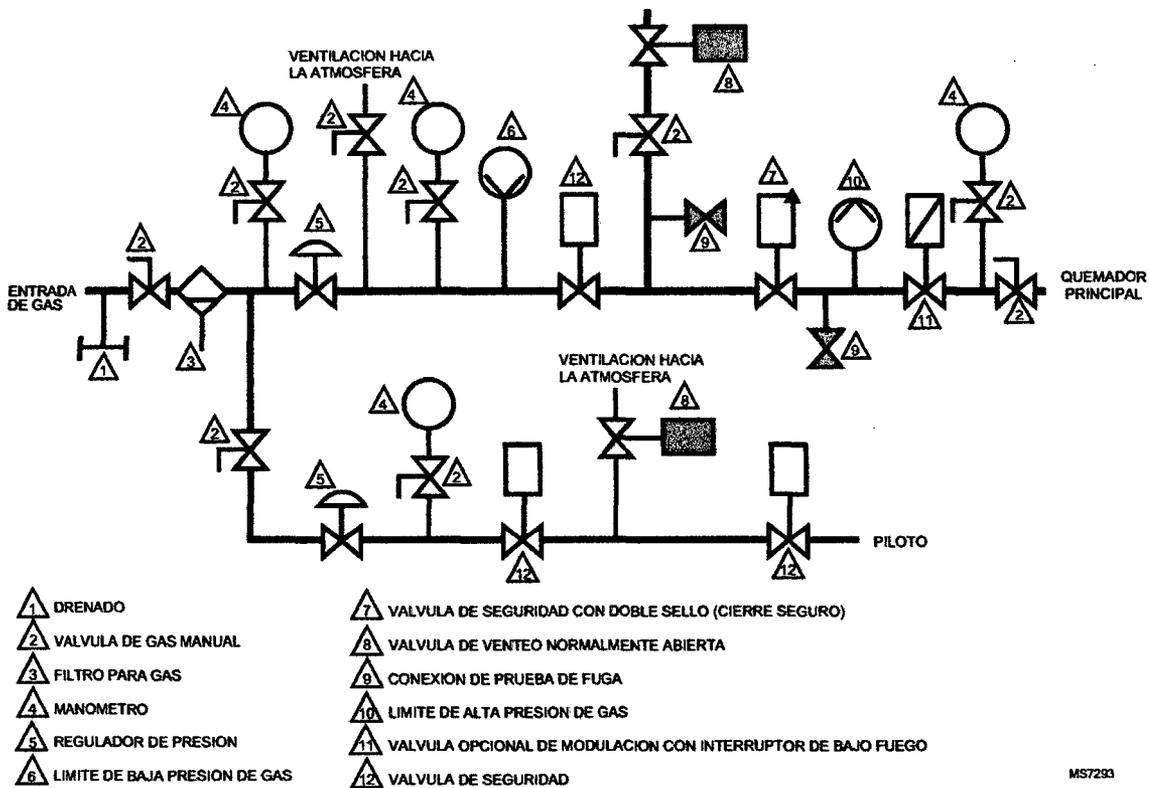


Fig. 2.

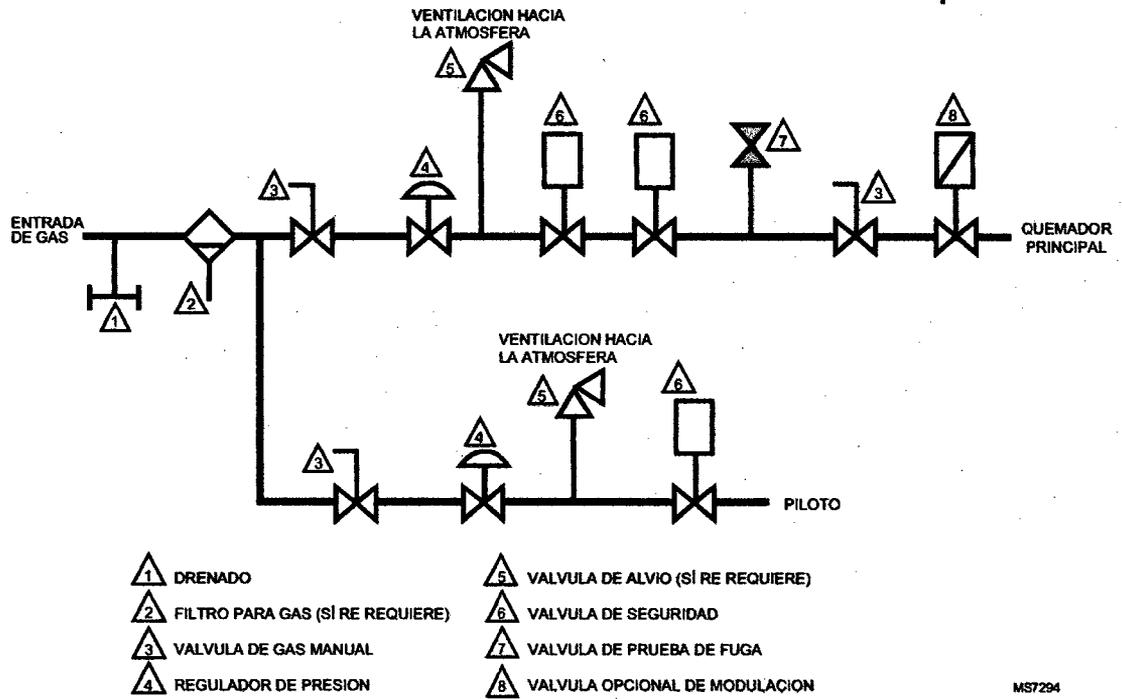


Fig. 3.

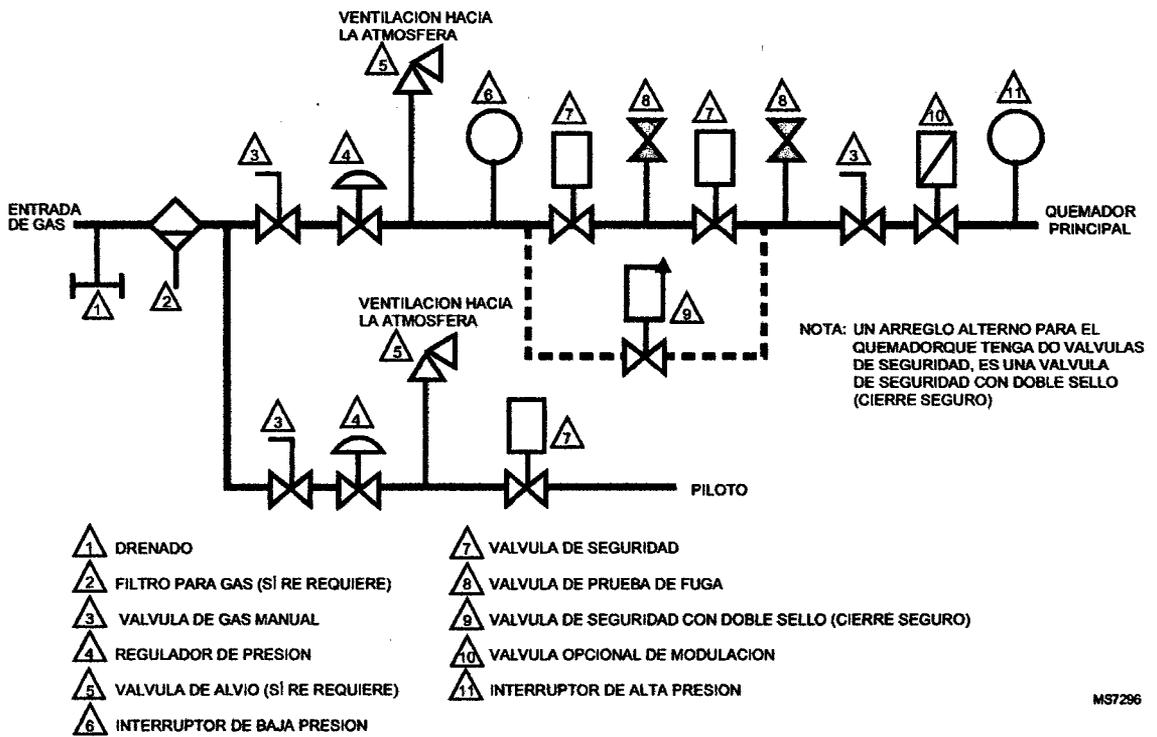


Fig. 4.

TRENES DE VALVULAS DE GAS RECOMENDADOS

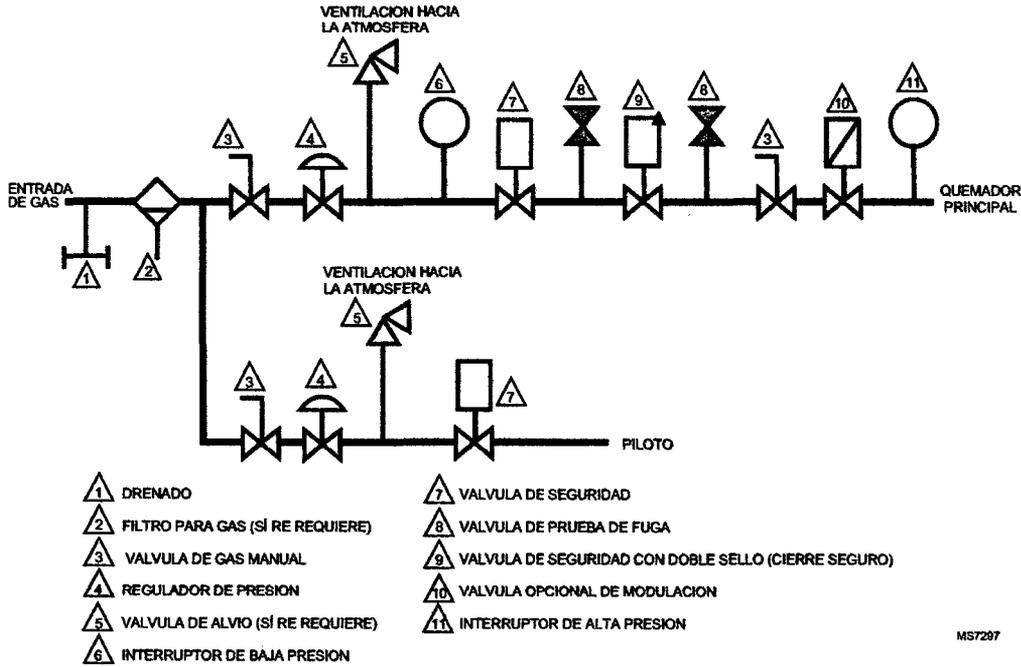


Fig. 5.

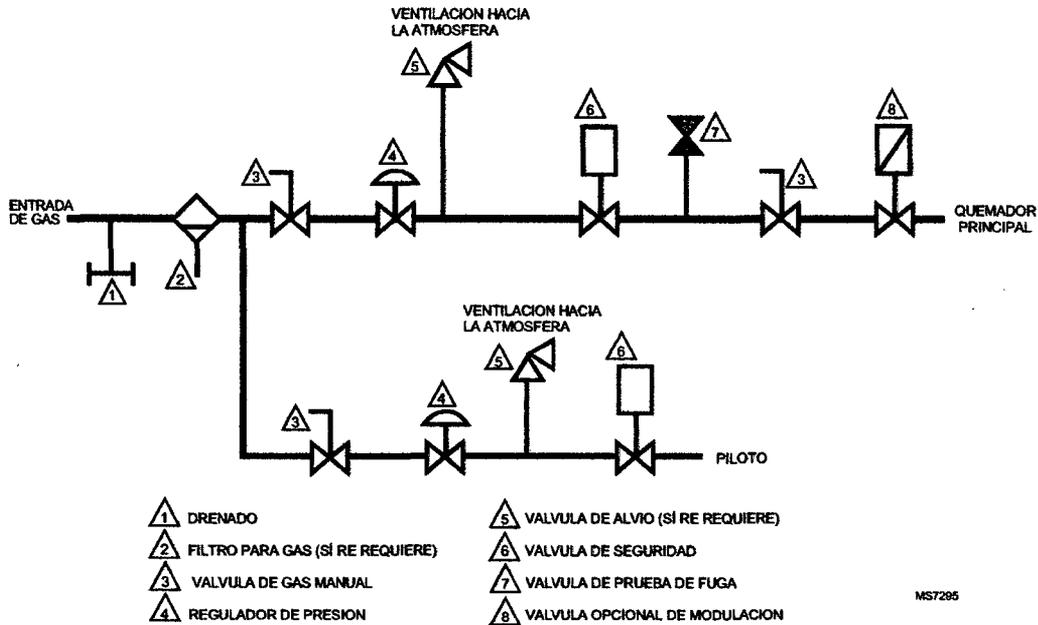


Fig. 6.

Honeywell

Honeywell América Latina
480 Sawgrass Corporate Parkway
Suite 200
Sunrise FL 33325
(954) 854-2600

Honeywell Argentina S.A.I.C
Belgrano 1156
1095 Buenos Aires
(54-1) 383-3627

Honeywell México S.A. de C.V.
Av. Constituyentes No. 900
Col. Lomas Altas
11950 Ciudad de México
México
(52-5) 259-1966

Honeywell Región Caribe
Honeywell
26 Ortegón Street
Caparra Heights, Guaynabo
Puerto Rico, 00968
(787) 792-7075

Honeywell Región Andina Latina
Honeywell C.A.
Av. Principal Los Cortijos de Lourdes
Edif. Honeywell
Caracas, Venezuela
(58-2) 239-0211





Serie 1330



Serie 2030

Características principales

Normalmente cerrada o normalmente abierta.
Versiones en acción directa o servodiafragma.
Cuerpo de aluminio inyectado.
Tapa matrizada de acero inoxidable o aluminio.
Conexiones roscadas BSP o NPT.
Asientos y diafragma de acrílico nitrilo.

Bobinas capsulada. Conexión DIN 43650.
Protección IP65 y NEMA4.
Apertura rápida o apertura lenta regulable hasta 10seg.
Cierre en menos de un segundo.
Opcional: microcontacto de prueba de válvula cerrada.

Especificaciones técnicas

Ø Conexión	Ø Pasaje mm.	Coef. Kv. m³/h	Presión diferencial bar		Peso en kg.	Número de catálogo
			Mínima	Máxima		
Normalmente cerrada - Acción directa						
1/2"	8	1,7	0	1	0,51	1330LA0
1/2"	18	2,7		0,2	0,50	1330LA04
3/4"	18	3,2		0,1	0,54	1330LA06
1"	32	10		0,05	0,98	2030LA08
1,1/4"	32	12		0,05	0,85	2030LA10
Normalmente cerrada - Servodiafragma - Apertura rápida						
1"	26	12	0,001	0,5	1,04	1330LA08
1,1/2"	48	35			1,83	2030LA12
2"	51	43			1,61	2030LA16
Normalmente cerrada - Servodiafragma - Apertura lenta						
1"	26	12	0,001	0,5	1,09	1330LA08L
1,1/2"	48	35			1,88	2030LA12L
2"	51	43			1,66	2030LA16L
Normalmente cerrada - Servodiafragma reforzado						
1"	26	12	0,01	2	1,04	1330LAR08
1,1/2"	45	35			1,83	2030LAR12
2"	45	43			1,61	2030LAR16
Normalmente abierta - Acción directa						
1/2"	20	3,5	0	0,2	1,16	1330LA04INA
3/4"	20	4,5			1,16	1330LA06INA
Normalmente abierta - Servodiafragma						
1"	26	12	0,001	0,5	1,04	1330LA08NA
1,1/2"	48	35			1,83	2030LA12NA
2"	51	43			1,61	2030LA16NA
Normalmente abierta - Servodiafragma reforzado						
1"	26	12	0,01	2	1,04	1330LAR08NA
1,1/2"	45	35			1,83	2030LAR12NA
2"	45	43			1,61	2030LAR16NA

Notas: 1 Con bobina reforzada las presiones máximas para la 1330LA06 es de 0,2 Bar.

2 La norma limita la presión máxima de trabajo en las válvulas a diafragmas Normalmente Cerradas en 0,16 Kg./cm².

Tabla de caudales para Gas Natural u otros en Nm³/h

P ₁	Caída de presión a través de la válvula en mm c.a.									
	20	40	60	80	100	120	150	200	250	300
200	1,62	2,28	2,79	3,22	3,60	3,94	4,40	5,06		
300	1,62	2,29	2,81	3,24	3,62	3,96	4,42	5,09	5,68	6,20
500	1,64	2,32	2,83	3,27	3,65	4,00	4,46	5,14	5,73	6,26
700	1,65	2,34	2,86	3,30	3,69	4,03	4,50	5,19	5,79	6,32
1000	1,68	2,37	2,90	3,35	3,74	4,09	4,57	5,26	5,87	6,42
1300	1,70	2,40	2,94	3,39	3,79	4,15	4,63	5,33	5,95	6,50
1600	1,72	2,43	2,98	3,44	3,84	4,20	4,69	5,41	6,03	6,59
2000	1,75	2,48	3,03	3,50	3,91	4,28	4,77	5,50	6,14	6,71
2500	1,79	2,53	3,09	3,57	3,99	4,36	4,87	5,62	6,27	6,85
3000	1,82	2,58	3,15	3,64	4,07	4,45	4,97	5,73	6,39	6,99
3500	1,86	2,63	3,22	3,71	4,14	4,54	5,07	5,84	6,52	7,13
4000	1,89	2,68	3,27	3,78	4,22	4,62	5,16	5,95	6,64	7,26
4500	1,93	2,72	3,33	3,85	4,30	4,70	5,25	6,06	6,76	7,39
5000	1,96	2,77	3,39	3,91	4,37	4,78	5,34	6,16	6,88	7,52

P₁ = Presión manométrica a la entrada de la válvula en mm c.a.

Base de cálculo:

Densidad relativa 0,65

Temperatura del fluido: 25°C

v 1

Factor de corrección en función de la densidad

Densidad relativa	0,60	0,62	0,65	1,00	1,20	1,50
Factor de corrección	1,04	1,02	1,00	0,81	0,74	0,66

Ejemplos de aplicación
Datos

Fluido: Gas Natural densidad 0,60

Caudal: 120 Nm³/h

Presión de entrada: 500 mm c.a.

Caída de presión admisible a través de la válvula: 15

Incognita: v.

Procedimiento

1º) Caudal / factor de corrección 120 / 1,04 115

2º) Buscar el valor en la intersección P₁ 500 mm c.a.

y Δp 60 mm c.a. en la tabla de caudal: valor hallado: 2,83.

3º) Caudal corregido / valor hallado v: 115 / 2,83

40,6

En la serie 2030 el valor más aproximado es:

2030LA16 v 43.

En la serie 1388 el valor más aproximado es:

1388LA16D v 45

Caída de presión para Kv = 45

1) Caudal corregido / v: 115 / 45 2,55

2) Buscar en la tabla el valor más cercano para

P₁ 500 mm c.a. valor hallado: en Δp 40 valor: 2,32

3) Cálculo del Δp: (2,55 / 2,32)² x 40 48 mm c.a.

Caída de presión para Kv = 43

1) Caudal corregido / v: 115 / 43 2,67

2) Buscar en la tabla el valor más cercano

para P₁ 500 mm c.a. valor hallado:

en Δp 60 valor: 2,83

3) Cálculo del Δp: (2,67 / 2,83)² x 60
53 mm c.a.

Cálculo para dos válvulas en serie con los mismos datos:

1) Caudal corregido: 120 / 1,04 115

2) Buscar en la tabla valor para Δp 60 ó Δp 80.

Elegimos Δp 80 3,27.

3) v 115 / 3,27 35,2 (v de 2 válvulas)

v para una válvula: 35,2 / 0,7 50,28.

4) Debemos buscar una válvula con v superior

a 51 para bajar el Δp de 80 A 75 mm c.a.

(de acuerdo a los datos indicados)

En la serie 2030 no hay ninguna válvula mayor que 43 por

lo tanto solamente puede ser posible en la serie 1388:

seleccionamos número de catálogo 1388LA20: v 55

v corregido: 55 x 0,70 38,5

Caída de presión para kv corregido = 38,5

1) Caudal corregido / v: 115 / 38,5 2,99

2) Buscar en la tabla la fila de P₁ 500 mm c.a.

el Δp con el valor más cercano: 2,83

para Δp 60.

3) Cálculo del Δp: (2,99 / 2,83)² x 60

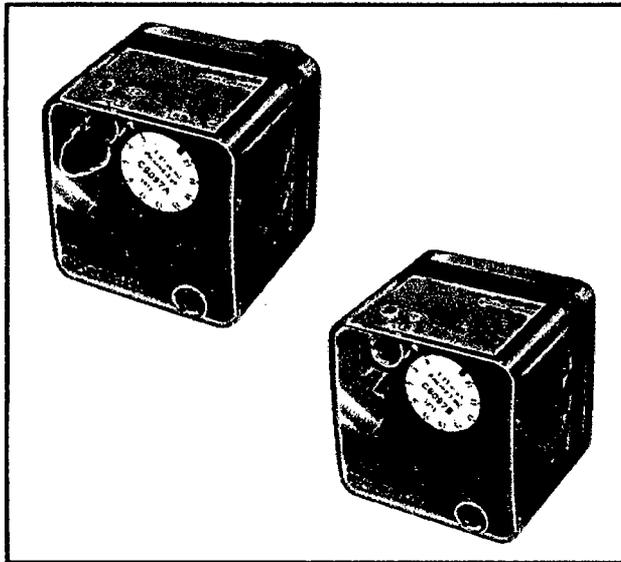
67 mm c.a.

Este valor de 67mm c.a. corresponde a la caída de

presión a través de las dos válvulas

C6097A,B Interruptores de Presión

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO



APLICACIÓN

Los Interruptores de Presión C6097 son dispositivos de seguridad utilizados en sistemas de presión positiva o de presión diferencial para sensar cambios de presión en gas o aire.

CARACTERÍSTICAS

- Para su uso con gas natural, gas propano (LP) o aire.
- Interruptor límite de seguridad con actuador de diafragma.
- Los modelos C6097A abren el circuito de control cuando existe una caída de presión por debajo del punto de operación.
- Los modelos C6097B abren el circuito de control cuando existe un incremento de presión por arriba del punto de operación.
- Bloqueo con opción de reinicio manual y reciclo.
- Los modelos de bloqueo tienen botón de reinicio manual externo.
- Cubierta transparente removible para proteger al tornillo de ajuste y a la placa graduada.
- Las salidas de tubería permiten la selección de presión positiva, presión diferencial (únicamente con aire) o conexiones de ventilación (únicamente con montaje NPT).
- Modelos con conexión de 1/4 pulg. NPT o con brida para su instalación directa en las Válvulas Industriales de Gas de Honeywell.
- Indicador luminoso, opcional, de posición del interruptor.
- Cubierta IP54 estándar.
- Rangos: 0.4 a 5 pulg. ca, 3 a 21 pulg. ca, 12 a 60 pulg. ca o 1.5 a 7 psi.
- Orificio de sobretensión.
- Limitador de venteo integrado.

Índice

Aplicación	1
Características	1
Especificaciones	2
Información para pedidos	2
Instalación	4
Lámpara Indicadora de posición de interruptor opcional ..	5
Cableado	6
Calibración y ajustes	7
Operación y verificación	7



ESPECIFICACIONES

Modelos:

C6097A Interruptor de presión: abre el circuito cuando la presión cae por debajo del punto de operación. Ver tabla 1.
 C6097B Interruptor de presión: abre el circuito cuando la presión sube por arriba del punto de operación. Ver tabla 1.

La Tabla 2 muestra los rangos del interruptor y la Tabla 3 muestra rangos eléctricos alternos cuando se utiliza con Programadores de Seguridad de Llama Honeywell.

Temperatura ambiente mínima: 5°F (-15°C).

Temperatura ambiente máxima: 140°F (60°C).

Conexiones (dependiendo del modelo):

Salida de 1/4 - 18 NPT para conexiones de la línea de gas principal o de alta presión.

Salida de 1/8 - 27 NPT para conexiones del venteo o de baja presión (únicamente para aire).

Bridas de instalación para conectar con las Válvulas Industriales de Gas de Honeywell (únicamente venteo interno, sin conexiones externas).

Rangos de escala:

0.4 a 5 pulg. ca (0.10 kPa a 1.25 kPa).

3 a 21 pulg. ca (0.75 kPa a 5.23 kPa).

12 a 60 pulg. ca (3.0 kPa a 15 kPa).

1.5 a 7 psi (1.03 kPa a 48 kPa).

Aprobaciones:

Underwriters Laboratories Inc., listado.

Canadian Standards Association, listado.

Factory Mutual: aprobado.

Industrial Risk Insurers: aceptable.

CSD-1 AFB: aceptable.

Accesorios:

32003041-001 C6097 Cubierta para los modelos con reinicio manual.

32003040-001 C6097 Cubierta para los modelos con reciclado.

32003039-001 Paquete de lámpara indicadora de posición.

Dimensiones: Ver Fig. 1 y 2.

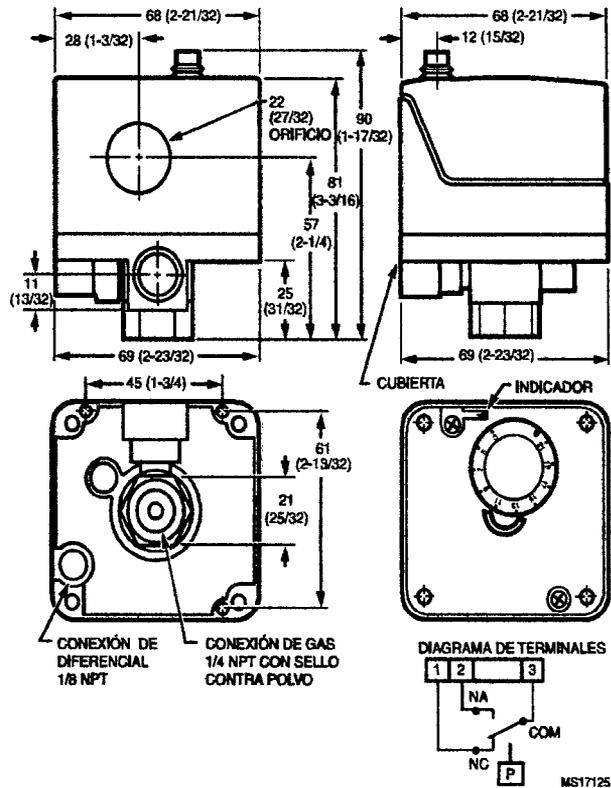


Fig. 1. C6097 1/4 pulg. NPT: Dimensiones de la base en pulg. (mm).

INFORMACIÓN PARA PEDIDOS

Cuando compre productos de reemplazo y modernización a su mayorista o distribuidor de TRADELINE®, refiérase al catálogo o listas de precios de TRADELINE® para tener el número de pedido completo, o especifique:

1. Número del modelo
2. Voltaje.

Si tiene preguntas adicionales, si necesita más información, o si quisiera dar sus comentarios sobre nuestros productos o servicios, escriba o llame a:

1. Su oficina de ventas local de Automatización y control desentlace (consulte las páginas blancas de su directorio telefónico)
2. Honeywell Customer Care
 1885 Douglas Drive North
 Golden Valley, MN 55422-4386

En Canadá: Honeywell Limited/Honeywell Limitée, 35 Dynamic Dr., Toronto, Ontario, M1V 4Z9. Oficinas internacionales de ventas y servicio en todas las principales ciudades de mundo. Manufactura en Australia, Canadá, Finlandia, Francia, Alemania, Japón, México, los Países Bajos, España, Taiwán, Reino Unido, EE.

ANEXO B
PROGRAMADOR

Módulos de Relé SERIE 7800 RM7800E, G, L, M; RM7840E, G, L, M

INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN

APLICACIONES

Los Módulos de Relé RM7800/RM7840 de Honeywell son controles de quemadores basados en micro procesadores para su aplicación en sistemas de encendido automático de gas, diesel o combinación de combustibles en un solo quemador. Los Módulos de Relé se utilizan para su aplicación en quemadores UL/CSA On/Off, UL/CSA Modulación y FM/IRI aplicaciones de quemadores de Modulación. El sistema RM7800/RM7840 consiste en un Módulo de Relé, Módulo de Pantalla con Teclado (de norma con el RM7800), Cubierta Guardapolvo (de norma con el RM7840), Subbase, Amplificador y Tarjeta de Purga. Las opciones incluyen Interfaz para Computadora Personal, DATA CONTROLBUS MODULE™, Montaje Remota de Pantalla, Anunciador Expandido y el Software Combustion System Manager™.

Las funciones que proporciona el RM7800 / RM7840 incluyen la secuencia automática de encendido de quemadores, supervisión de llama, indicación del estado del sistema, diagnóstico del sistema o autodiagnóstico y detección de problemas. El RM7800/RM7840 es un sustituto de estado sólido para el Programador Automático electromecánico R4140.

Este documento proporciona instrucciones para su instalación y revisión estática. Otras publicaciones que son aplicables son:

- 65-0084: Q7800A, B 22 Datos del Producto de la Subbase de Cableado de 22 Terminales.
- 65-0089: ST7800A, Instrucciones de Instalación del Tarjeta de Purga.
- 65-0090: S7800A Datos del Producto Módulo de Pantalla con Teclado.
- 65-0091: S7810A, Información del Producto Data Control-Bus Module™.
- 65-0095: S7820, Datos del Producto Módulo de Reinicio Remoto.
- 65-0097: 221729C, Hoja de Empaque de la Cubierta Guardapolvo.
- 65-0101: S7830, Datos del Producto Anunciador Expandido.
- 65-0109: R7824, R7847, R7848, R7849, R7861, R7886, Datos del Producto Amplificadores de Llama para la SERIE 7800.
- 65-0118: MÓDULOS DE RELÉ SERIE 7800 Datos del Producto, Revisión e Identificación de Problemas.
- 65-0131: 221818A, Datos del Producto Ensamble del Cable de Extensión.

ESPECIFICACIONES

Rangos eléctricos, ver la Tabla 3:

Voltaje y Frecuencia: 120 Vca, (+10% / -15%), 50 ó 60 Hz (± 10%).

Disipación de Energía: RM7800 / RM7840: 10 W máximo. Máxima Carga Total Conectada: 2000 VA.

Fusibles: Carga Total Conectada: máximo 20 A, tipo FRN o equivalente.

Rangos Ambientales:

Temperatura Ambiente:

De Operación: De -40°F a 140°F (de -40°C a +60°C)

De Almacén: De -40°F a 150°F (de -40°C a +66°C)

Humedad: 85% de humedad relativa continua, sin condensación.

Vibración: 0.5G ambiental.

Aprobaciones:

Underwriters Laboratories Inc. Registro: Archivo No. MP268, Guía No. MCCZ.

Certificación de la Asociación Canadiense de Normas: LR9S329-3.

Aprobación Factory Mutual: Reporte No. J.I.1V9A0.AF.

Aceptado por Industrial Risk Insurers (IRI).

Comisión Federal de Comunicaciones: Parte 15, Clase B, Emisiones.

INSTALACIÓN

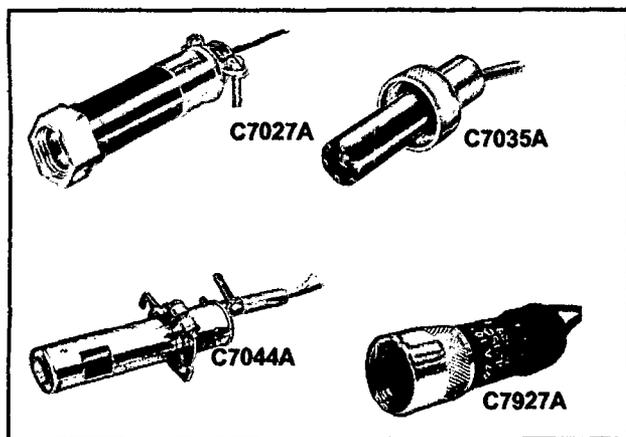
Cuando Instale Este Producto...

1. Lea estas instrucciones cuidadosamente. El fallar en seguirlos puede dañar el producto u ocasionar una condición de riesgo.
2. Revise los rangos dados en las instrucciones y los que están marcados en el producto para estar seguro de que el producto es adecuado para la aplicación.
3. El instalador debe ser un técnico en el servicio de seguridad de llama, entrenado y con experiencia.
4. Una vez que esté terminada la instalación, revise la operación del producto tal como está indicado en estas instrucciones.



C7027A, C7035, C7044A, C7927A Minipeeper® Ultraviolet Flame Detectors

PRODUCT DATA



APPLICATION

The C7027A, C7035A, C7044A and C7927A Minipeeper® Ultraviolet Flame Detectors detect the ultraviolet radiation emitted by combustion flames. The flame detectors are used with Honeywell flame safeguard controls to provide flame supervision for gas, oil, or combination gas-oil burners.

FEATURES

- C7027A, C7035A, and C7044A Flame Detectors are used with R7249A, R7290A, R7749B and R7849A,B Amplifiers and the appropriate Honeywell controls.

- C7044A may also be used with the following 50 Hz Honeywell combustion controls/amplifiers:
 - R4341/R7323
 - R4343/R7323
 - R4344/R7323
- C7027A has an integral collar threaded (internal 1/2-14 NPSM) for mounting on a one-half-inch sight pipe.
- C7035A has an integral collar threaded (internal 1-11-1/2 NPSM) for mounting on a one-inch sight pipe.
- C7035A housing meets Underwriters Laboratories Inc. requirements for rain tightness and complies with NEMA enclosure standards, types 4 and 4X.
- C7044A mounts with a two screw bracket. The UV sensor tube is enclosed in a stainless steel housing.
- C7044A has the capability of side or end viewing in flame monitoring applications.
- Because of their compact size, the C7027A and C7044A are particularly suitable for blast tube mounting.
- Properly installed, the C7027A and C7035A are pressure rated for 5 psi.
- C7035A ultraviolet radiation sensor tube is field replaceable.
- Two C7027A, C7035A or C7044A Flame Detectors can be wired in parallel for difficult flame sighting installations.
- C7927A is used with only the R7851B Flame Amplifier and the appropriate Honeywell controls.
- C7927A has an integral collar threaded (internal 1/2-14 NPSM) for mounting on a one-half inch sight pipe.

Contents

Application	1
Features	1
Specifications	2
Ordering Information	2
Installation	4
Wiring (All Models—Fig. 10)	8
Adjustments and Checkout	9
Troubleshooting	12
Maintenance	12



SPECIFICATIONS

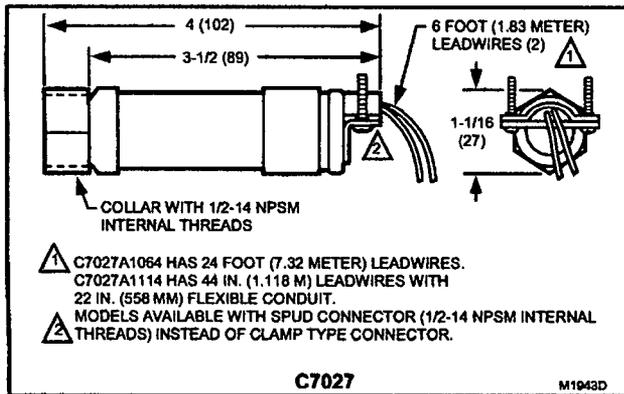


Fig. 1. Installation dimensions of C7027A in in. (mm).

C7027A Minipeeper® Ultraviolet Flame Detector:

Ambient Operating Temperature Ratings: 0°F to 215°F (-18°C to 102°C), or -40°F to 215°F [-40°C to +102°C], depending on model.

Maximum Pressure Rating: 5 psi (34.5 kPa).

Mounting: Collar with 1/2-14 NPSM internal threads for mounting on a 1/2 in. sight pipe.

Wiring Connections: Two 6 ft [1.83 m], color-coded, NEC Class 1 leadwires, rated for 221°F (105°C). (C7027A1064 has 24 ft [7.32 m] leadwires.) Rear of detector has a clamp type connector for 1/2 in. flexible metallic conduit. (Models are available with 1/2 in. internally threaded spud connector instead of the clamp). C7027A1114 has 44 in. (1.118 m) leadwires and 22 in. (558 mm) flexible conduit.

Dimensions: See Fig. 1.

Replacement Part: 129685 Flange Gasket.

NOTE: The ultraviolet radiation sensing tube is not field replaceable.

Accessory:

136733 Heat Block, laminated plastic, insulating the flame detector from sight pipe temperatures up to 266°F (130°C), 1/2-14 NPSM external threads on one end and 1/2-14 NPSM internal threads on the other end (see Fig. 8). Included with C7027A1080.

390427B Bushing, for mounting to 3/8 in. sight pipe. Included with C7027A1080.

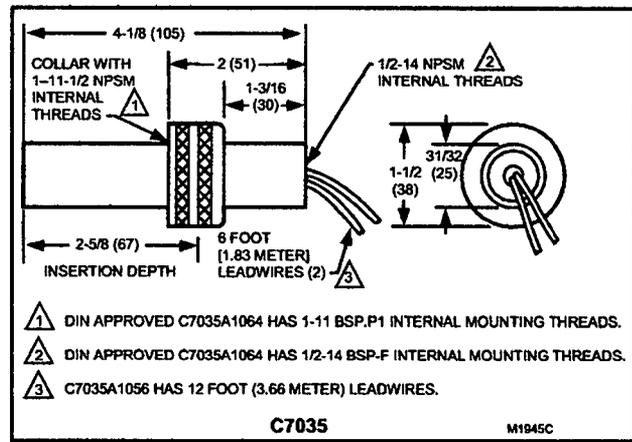


Fig. 2. Installation dimensions of C7035A in in. (mm).

ORDERING INFORMATION

When purchasing replacement and modernization products from your TRADELINE® wholesaler or distributor, refer to the TRADELINE® Catalog or price sheets for complete ordering number.

If you have additional questions, need further information, or would like to comment on our products or services, please write or phone:

1. Your local Home and Building Control Sales Office (check white pages of your phone directory).
2. Home and Building Control Customer Relations
Honeywell, 1885 Douglas Drive North
Minneapolis, Minnesota 55422-4386 (800) 328-5111

In Canada—Honeywell Limited/Honeywell Limitée, 35 Dynamic Drive, Scarborough, Ontario M1V 4Z9.

International Sales and Service Offices in all principal cities of the world. Manufacturing in Australia, Canada, Finland, France, Germany, Japan, Mexico, Netherlands, Spain, Taiwan, United Kingdom, U.S.A.

ANEXO C

TABLA DE EFICIENCIAS

PERFORMANCE DATA

Efficiency Tables A10-5, A10-6, and A10-7 show predicted fuel-to-steam efficiencies (excluding radiation and convection losses) for Cleaver-Brooks Model CBR Firetube boilers. For specific efficiencies on firetube boiler offerings not listed here, contact your local Cleaver-Brooks authorized representative.

Emissions The emission data included in this section (Table A10-8) consists of typical uncontrolled emission levels for Cleaver-Brooks Model CBR Firetube Boilers.

Cleaver-Brooks Firetube boilers are available with the standard burner package for Model CBR, or optional internal flue gas recirculation on.

The Cleaver-Brooks IFGR packages are integrated boiler/burner/control packages designed specifically for Cleaver-Brooks boilers. For detailed information on Cleaver-Brooks IFGR packages, refer to Model CB (LE) in Section A2.

Notice

The data in Table A10-8 represents typical emission levels only. Guaranteed emission levels are available from your local Cleaver-Brooks authorized representative.

Table A10-5. Predicted Fuel-to-Steam Efficiencies (%), Model CBR Boilers, Natural Gas

BHP	OPERATING PRESSURE = 10 psig				OPERATING PRESSURE = 125 psig			
	% OF LOAD				% OF LOAD			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
125	84.4	84.5	84.0	83.4	81.6	81.8	81.5	81.0
150	84.3	84.4	83.7	83.0	81.5	81.6	81.2	80.7
200	84.5	84.9	84.5	84.1	81.7	82.2	82.0	81.7
250	84.2	84.2	83.5	82.6	81.4	81.5	80.9	80.3
300	84.4	84.5	84.0	83.4	81.5	81.8	81.5	81.0
350	84.6	85.1	84.8	84.5	81.8	82.4	82.3	82.1
400	84.8	84.3	83.6	82.7	82.0	81.8	81.1	80.4
500	84.7	84.2	83.4	82.5	82.0	81.7	81.0	80.1
600	85.0	84.8	84.4	83.8	82.3	82.3	81.9	81.4
700	85.3	85.3	85.1	84.8	82.6	82.8	82.7	82.4
800	85.2	85.3	85.0	84.6	82.5	82.7	82.6	82.3

Table A10-6. Predicted Fuel-to-Steam Efficiencies (%), Model CBR Boilers - No.6 Oil

BHP	OPERATING PRESSURE = 10 psig				OPERATING PRESSURE = 125 psig			
	% OF LOAD				% OF LOAD			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
125	88.3	88.4	87.8	87.2	85.3	85.6	85.2	84.7
150	88.2	88.2	87.5	86.8	85.2	85.4	84.9	84.3
200	88.4	88.8	88.4	87.9	85.5	85.9	85.7	85.5
250	88.1	88.0	87.3	86.4	85.1	85.2	84.6	84.0
300	88.3	88.4	87.8	87.1	85.3	85.5	85.2	84.7
350	88.5	89.0	88.7	88.3	85.6	86.1	86.1	85.9
400	88.6	88.1	87.3	86.5	85.8	85.5	84.8	84.0
500	88.6	88.0	87.2	86.2	85.7	85.4	84.6	83.8
600	88.9	88.7	88.2	87.6	86.1	86.1	85.7	85.1
700	89.2	89.2	89.0	88.6	86.3	86.6	86.4	86.2
800	89.1	89.1	88.9	88.5	86.3	86.5	86.3	86.0

Table A10-7. Predicted Fuel-to-Steam Efficiencies (%), Model CBR Boilers - No. 2 Oil

BHP	OPERATING PRESSURE = 10 psig				OPERATING PRESSURE = 125 psig			
	% OF LOAD				% OF LOAD			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
125	87.8	88.0	87.4	86.8	85.0	85.2	84.9	84.5
150	87.7	87.8	87.2	86.4	84.9	85.1	84.6	84.1
200	88.0	88.3	88.0	87.5	85.2	85.6	85.4	85.2
250	87.6	87.6	86.9	86.1	84.8	84.9	84.3	83.7
300	87.8	88.0	87.4	86.8	85.0	85.2	84.9	84.4
350	88.1	88.5	88.3	87.9	85.3	85.8	85.7	85.6
400	88.2	87.7	87.0	86.1	85.5	85.2	84.5	83.8
500	88.1	87.6	86.8	85.9	85.4	85.1	84.4	83.6
600	88.5	88.3	87.8	87.2	85.7	85.7	85.4	84.9
700	88.7	88.8	88.5	88.2	86.0	86.2	86.1	85.8
800	88.7	88.7	88.4	88.1	85.9	86.2	86.0	85.7

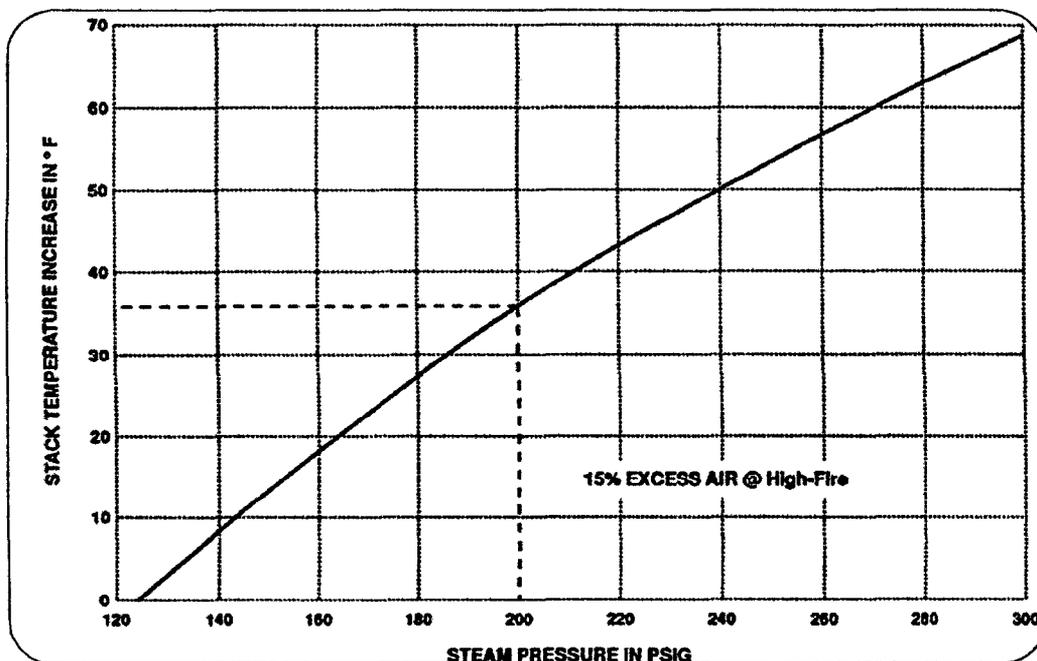


Figure A10-6. Predicted Stack Temperature Increase for Pressure Greater Than 125 psig

ANEXO D
REGULADOR DE PRESIÓN

Los reguladores de presión 217,225,227 pertenecen a la serie de reguladores S-200, ampliamente utilizada en instalaciones comerciales e industriales, donde la presión de entrada es de hasta 25 bar, y se necesita una presión regulada entre 9 mbar y 500 mbar. Estos modelos se diferencian de los otros por tener protección contra excesos en la presión de salida regulada, por medio de su sistema de bloqueo reseteable manualmente.

Este sistema es ideal en aquellos casos donde no es aconsejable instalar venteo para dar seguridad por alivio. Actúa cuando la presión regulada supera a la deseada entre 15 y 60 mbar (estos valores son ajustados por medio de un resorte cuya presión se regula externamente).

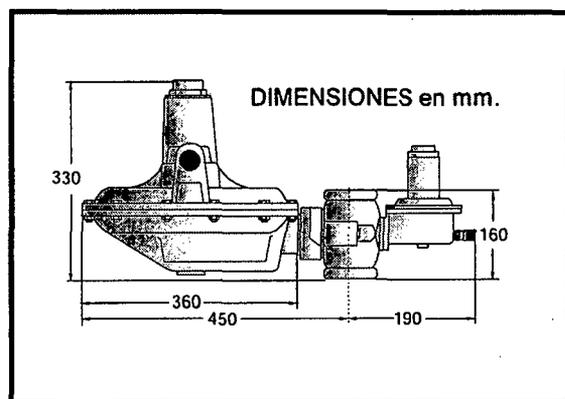
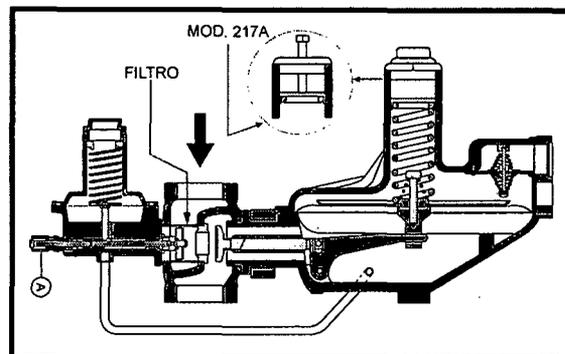
Su funcionamiento es el siguiente: una presión de salida excesiva forzará el diafragma del bloqueo a moverse desenganchando el mecanismo de bloqueo. Esto libera el vástago permitiendo al obturador de bloqueo efectuar el corte.

Esta condición se mantiene hasta que se resetee el sistema.

Para ello, liberar toda presión después del regulador, desenroscar el seguro A y tirar del mismo hasta que comience a pasar gas. Luego volver a enroscarlo.

Su conexión a la cañería se efectúa por medio de roscas $\varnothing 2''$ a la entrada y a la salida (opcional conexión a bridas). La posición de instalación es indistinta, pudiendo girarse la caja diafragma 360° respecto al cuerpo siempre y cuando se modifique la forma del tubo de cobre (debe dejarse en una posición cómoda el RESET y los resortes de regulación de presión).

Posee un filtro incorporado que debe ser revisado periódicamente. Para acceder al mismo se quitan los cuatro (4) tornillos del bloqueo y se extraen ambos.



COD.	Øalambre	Presión regulada en bar
R33	3,25	0,015 a 0,025
R32	4,00	0,022 a 0,040
R15	4,50	0,030 a 0,075
R31	5,50	0,080 a 0,150
R45	6,00	0,150 a 0,180
R16	6,75	0,17 a 0,230
R17	0,75	Todos
R5	1,75	P.regulada hasta 0,05
R6	2,50	P.regulada mayor a 0,05

DATOS TECNICOS	
Conexiones:	Roscado 2" BSP ó NPT o Bridado S-150
Temperatura de operación:	-20°C a 60°C
Peso aproximado:	12,7 Kg
MATERIALES	
Cuerpo principal:	Fundición nodular (217-227) Acero (225)
Internos:	Latón
Diafragma:	Acirilo Nitrilo
Obturador:	Acirilo Nitrilo

Modelo S-217-225: Tabla de capacidades en Nm³/hora (Sensibilidad 10%)

Presión de salida (mBar)	Presión de entrada (bar)	Gás Natural (0,6)						
		Ø de orificios en mm.						
		6,4	9,5	12,7	15,8	19,1	25,4	30,2
20	0.035	-	-	15	21	30	42	55
	0.07	-	12	20	28	35	65	85
	0.16	9	18	30	41	52	110	145
	0.35	13	27	45	75	120	160	190
	0.5	23	47	78	110	140	200	240
	1	37	75	125	160	180	230	260
	1.5	42	84	140	220	230	260	280
	2.5	45	91	152	260	270	280	-
	4	66	132	165	280	305	-	-
	5	70	140	175	320	350	-	-
	7	143	164	205	350	-	-	-
	10	154	176	220	360	-	-	-
	12*	175	190	235	-	-	-	-
	15*	220	240	260	-	-	-	-
	19*	260	280	310	-	-	-	-
25*	290	320	-	-	-	-	-	
28	0.035	-	-	15	21	30	38	60
	0.07	-	12	20	28	35	55	85
	0.16	9	18	30	41	52	75	150
	0.35	13.5	27	45	75	120	150	200
	0.5	24	48	80	115	145	175	240
	1	39	79	130	160	180	190	260
	1.5	43	87	145	220	230	250	280
	2.5	46	95	155	260	270	280	-
	4	72	144	180	280	300	-	-
	5	76	152	190	320	340	-	-
	7	150	172	215	350	-	-	-
	10	168	192	240	360	-	-	-
	12*	195	210	260	-	-	-	-
	15*	230	270	290	-	-	-	-
	19*	280	320	350	-	-	-	-
25*	310	360	-	-	-	-	-	
50	0.07	-	-	16	22	32	40	75
	0.16	-	12	20	35	45	70	120
	0.35	10	19	32	62	105	110	150
	0.5	12	24	40	75	120	135	210
	1	19	37	62	90	180	210	250
	1.5	31	63	105	150	210	250	280
	2.5	63	126	210	280	320	390	-
	4	100	200	250	300	360	-	-
	5	112	224	280	320	380	-	-
	7	231	264	330	370	-	-	-
	10	245	280	350	380	-	-	-
	12*	210	290	370	-	-	-	-
	15*	240	320	390	-	-	-	-
	19*	290	360	410	-	-	-	-
	25*	320	380	-	-	-	-	-

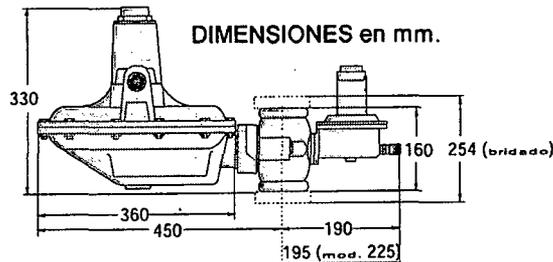
Presión de salida (mBar)	Presión de entrada (bar)	Gás Natural (0,6)						
		Ø de orificios en mm.						
		6,4	9,5	12,7	15,6	19,1	25,4	30,2
70	0.16	-	-	14	22	30	42	90
	0.35	-	15	25	30	41	60	130
	0.5	10	19	32	45	62	95	150
	1	20	39	65	82	95	234	286
	1.5	33	66	110	142	165	377	416
	2.5	55	111	185	245	285	494	-
	4	120	240	300	320	380	-	-
	5	135	270	338	365	400	-	-
	7	255	292	365	380	-	-	-
	10	287	328	390	400	-	-	-
	12*	220	340	430	-	-	-	-
	15*	250	370	450	-	-	-	-
	19*	300	410	490	-	-	-	-
	25*	330	430	-	-	-	-	-
	160	0.2	-	11	18	25	42	60
0.35		-	18	30	36	60	90	110
0.5		11	23	38	55	95	120	140
1		24	48	80	105	120	180	234
1.5		39	78	130	158	165	210	325
2.5		66	132	220	250	270	494	-
4		124	248	290	310	330	494	-
5		140	281	320	330	360	-	-
7		266	304	350	370	-	-	-
10		287	328	390	400	-	-	-
12*		280	360	450	-	-	-	-
15*		280	390	490	-	-	-	-
19*		340	430	550	-	-	-	-
25*		360	450	-	-	-	-	-
350 (Máx. 500) Modelo alta presión (217A - 225A)		0.5	23	30	40	60	55	75
	1	34	42	75	105	117	130	182
	1.5	44	65	104	156	169	195	234
	2.5	57	104	221	260	273	285	350
	4	78	182	260	338	350	350	-
	5	98	247	338	364	380	-	-
	7	117	312	390	442	-	-	-
10	124	332	416	468	-	-	-	

*Capacidades con presión de entrada mayor a 10 bar corresponden a modelo S-225

Modelo S-227: Tabla de capacidades en Nm³/hora (Sensibilidad 10%)

Presión de salida (mbar)	Presión de entrada (bar)	Gás Natural (0,6)		
		Ø de orificios en mm.		
		6,4	9,5	12,7
20	2.5	45	85	145
	4	66	100	155
	5	70	115	160
	7	100	125	170
	10	120	135	180
	12	140	150	190
	15	195	210	230
	19	220	240	260

Presión de salida (mbar)	Presión de entrada (bar)	Gás Natural (0,6)		
		Ø de orificios en mm.		
		6,4	9,5	12,7
160	2.5	66	110	160
	4	110	170	215
	5	127	180	230
	7	150	195	249
	10	157	213	266
	12	249	280	350
	15	265	300	375
	19	320	360	450



GAS	DENSIDAD	FACTOR K
BUTANO	2	0.55
PROPANO (GLP)	1.5	0.63
ANHIDRICO CARBONICO	1.5	0.63
OXIGENO	1.1	0.74
AIRE	1	0.77
NITROGENO	0.97	0.79
ACETILENO	0.9	0.82
AMONIACO	0.59	1.02
HIDROGENO	0.07	3

Para obtener las capacidades con otros gases, multiplicar el valor de la tabla por el factor K.

CONVERSIÓN DE UNIDADES

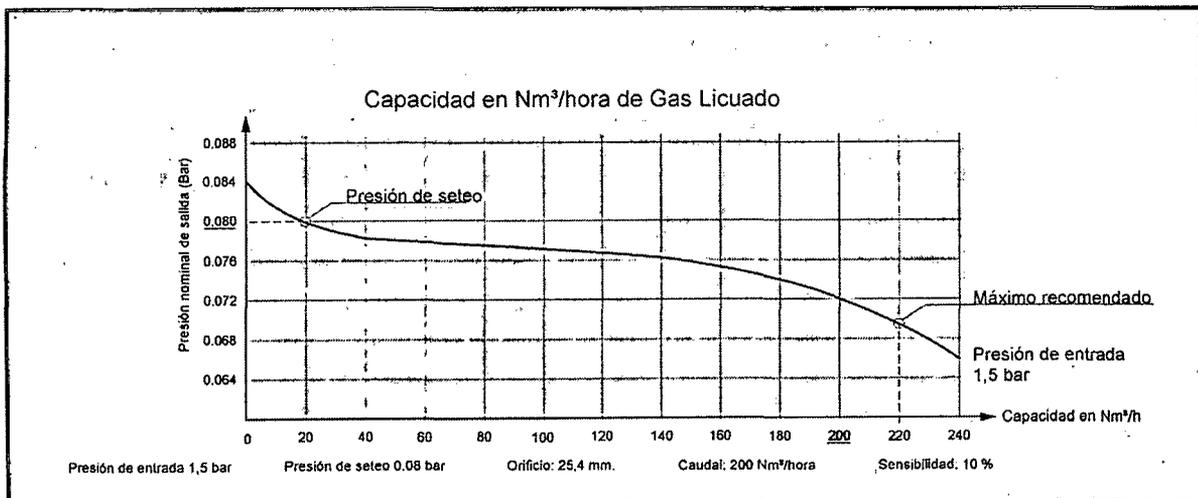
PRESIÓN

Para obtener	Libras por pulgada cuadrada (psi)	Pulgadas columna de agua (in H ₂ O)	milímetros columna de agua (mm H ₂ O)	Pulgadas de columna de mercurio (in Hg)	Milímetros de columna de mercurio (mm Hg)	Bar (bar)	Milibar (mbar)	Kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm ²)
Multiplicar								
psi	1	27,68	703,1	2,036	51,7	0,06895	68,95	0,0703
in H ₂ O	0,0361	1	25,4	0,07355	1,87	0,002491	2,491	0,00254
mm H ₂ O	0,0014	0,0394	1	0,00289	0,07355	0,000098	0,0981	0,0001
in Hg	0,4911	13,6	345,4	1	25,4	0,03386	33,86	0,03453
mm Hg	0,01934	0,535	13,6	0,03937	1	0,001333	1,333	0,00136
bar	14,5	401,5	10198,1	29,53	750,06	1	1000	1,02
mbar	0,0145	0,4015	10,1981	0,02953	0,7501	0,0001	1	0,00102
Kg/cm ²	14,22	393,7	10000	28,96	735,58	0,9807	980,7	1
Kpa	0,145	4,015	101,98	0,2953	7,501	0,01	10	0,0102

CAUDAL

Para obtener	Pie cubico x hora (Scf/h)	Metro cubico x hora (Scm/h)	Pie cubico x día (Scf/d)	Metro cubico x día (Scm/d)
Multiplicar				
Pie cubico por hora	1	0,028	24	0,672
Metro cubico por hora (15°C, 1,01325 bara)	35,71	1	857,04	24
Pie cubico por día	0,0417	0,0012	1	0,028
Metro cubico por día	1,4879	0,0417	35,71	1

CURVA DE FUNCIONAMIENTO PARA GLP



EQA
EQUIPOS QUEMADORES AUTOMATICOS

ANEXO E
TABLAS DE CÁLCULO

I. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Eficiencia térmica en llama grande	η_h	88,70%		Usando petróleo industrial N°6. Eficiencias después del deshollinado en base al poder calorífico superior.
Eficiencia térmica en llama media	η_h	88,40%		
Eficiencia térmica en llama chica	η_h	87,40%		
Eficiencia térmica promedio	η_h	88,160%		
Pérdida por gases de la chimenea		11,840%		Varia de 1% -3% (tomaremos 2-5%).
Pérdidas convección, radiación y otros		2,50%		
Eficiencia de la caldera (en base al PCS)	η	85,66%		

II. CÁLCULO DEL CONSUMO DE PETRÓLEO INDUSTRIAL N°6

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Eficiencia de la caldera	η	85,66%		En base al PCS
Calor útil	\dot{Q}_a	168.7000	kcal/h	
Poder calorífico superior	PCS	10.220	kcal/Kg	
Poder calorífico inferior	PCI	9.670,5	kcal/Kg	
Flujo másico de petróleo N°6	\dot{m}_f	192,70195	Kg/h	
Calor del combustible	\dot{Q}_c	1.969.413,962	kcal/h	En base al PCS
Calor del combustible	\dot{Q}_c	1.863.524,239	kcal/h	En base al PCI

III. CÁLCULO DEL CONSUMO DE GAS NATURAL

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Eficiencia de la caldera (en base al PCS)	η	81,91%		Eficiencia disminuye entre 3.7-3.8%, para un diseño conservativo usaremos el promedio 3.75%
Potencia útil o Calor útil	Q_a	168.7000	kcal/h	
Poder calorífico superior	PCS	9.652	kcal/Sm ³	
Poder calorífico superior	PCS	12.847	kcal/Kg	
Poder calorífico inferior	PCI	11.605,24	kcal/Kg	
Flujo volumétrico del gas natural	V_{gn}	213,3835	Sm ³ /h	
Gravedad específica	G	0,613		
Densidad del aire en cond. Standares	ρ_a	1,22565	kg/Sm ³	
Densidad del gas natural en cond. Standares	ρ_{gn}	0,75132345	kg/Sm ³	
Flujo másico del gas natural	\dot{m}_{gn}	160,320	kg/h	
Flujo del gas equivalente al petróleo N°6	B	153,298	kg/h	Da la misma cantidad de calor que el petróleo Industrial N°6
Calor del combustible (en base al PCS)	\dot{Q}_c	2.059.631,435	kcal/h	
Calor del combustible (en base al PCI)	\dot{Q}_c	1.860.552,335	kcal/h	

IV. CÁLCULO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN PARA PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 6

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Flujo másico de petróleo N°6	\dot{m}_f	192,7019532	kg/h	
Relación teórica de aire/combustible	A/F_t	10,824714	Nm ³ /kg comb.	Tomado del cal detall. Aire
Flujo volumétrico de aire teórico	\dot{V}_{at}	2.085,943531	Nm ³ /h	
		2.200,555813	Sm ³ /h	
Índice de exceso de aire	λ	1,28		De las mediciones de campo
Relación real aire/combustible	A/F_r	13,86	Nm ³ /kg comb.	
Flujo volumétrico de aire real	\dot{V}_{ar}	2.670,00772	Nm ³ /h	
		2.816,711441	Sm ³ /h	

V. CÁLCULO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN PARA EL GAS NATURAL

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Flujo volumétrico del gas natural	\dot{V}_{gn}	213,3835045	Sm ³ /h	
		202,2697803	Nm ³ /h	
Relación teórica de aire/ combustible	A/F_t	10,19209859	Nm ³ /Nm ³ _{gn}	Tomado del cal. detall. Aire
Flujo volumétrico de aire teórico	\dot{V}_{at}	2.061,553542	Nm ³ /h	
		2.174,825715	Sm ³ /h	
Índice de exceso de aire	λ	1,22		De las mediciones de campo
Relación real aire/combustible	A/F_r	12,43	Nm ³ /Nm ³ _{gn}	
Flujo volumétrico de aire real	\dot{V}_{ar}	2.515,095321	Nm ³ /h	
		2.653,287372	Sm ³ /h	

VI. EVALUACIÓN DEL VENTILADOR DEL AIRE DE COMBUSTION

	REQUERIMIENTOS DE AIRE		
	Petróleo industrial 6	Gas natural	Unidades
Flujo volumétrico de aire teórico (\dot{V}_{at})	2.085,943531	2.061,553542	Nm ³ /h
Flujo volumétrico de aire real (\dot{V}_{ar})	2.670,00772	2.515,095321	Nm ³ /h

VII. CÁLCULO DE DIMENSIONES DE LLAMA

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Flujo másico de petróleo N°6	\dot{m}_f	192,7019532	kg/h	
Índice de exceso de aire	λ	1,28		De las mediciones de campo
Volumen de gases de combustión por kg de combustible	V_{gf}	14,50406192	Nm ³ /Kg comb.	Tomado del cal detall. Aire
Flujo volumétrico real de gases de combustión	\dot{V}_g	2.794,961062	Nm ³ /h	
		2.948,530351	Sm ³ /h	

VIII. TEMPERATURA FINAL DEL HOGAR

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIONES
Flujo volumétrico del gas natural		213,3835045	Sm ³ /h	
		202,2697803	Nm ³ /h	
Índice de exceso de aire	λ	1,22		De las mediciones de campo
Volumen de gases de combustión por Nm ³ de combustible	V_{gf}	13,49	Nm ³ /Nm ³ _{gn}	
Flujo volumétrico real de gases de combustión		2.728,260938	Nm ³ /h	
		2.878,165385	Sm ³ /h	

IX. EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE GASES GENERADOS EN LA COMBUSTIÓN

	Petróleo industrial 6	Gas natural	Unidades
Flujo volumétrico real de gases de comb. (\dot{V}_g)	2.794,961062	2.728,260938	Nm ³ /h

ANEXO F

COSTOS

1. DETALLE DE COSTOS DE QUEMADOR NUEVO

1.1 Costo de los equipos

ITEM	DESCRIPCION	CANT	UNID	PRECIO UNID	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Quemador nuevo	1	Juego	29.242	29.242
2	Estación reductora secundaria	1	Juego	2.500	2.500

1.2 Costo de los materiales

ITEM	DESCRIPCION	CANT	UNID	PRECIO UNID	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Cono refractario	1	Unidad	1.000	1.000
2	Tuberia más niplería	1	Glob	200	100
3	Pinturas	1	Glob	50	50
4	Empaquetaduras	1	Glob	20	20
5	Pernos	1	Glob	15	15
6	Cables eléctricos	1	Glob	100	100
7	Tuberías conduit	1	Glob	100	100
8	Conexiones	1	Glob	150	100
9	Consumibles varios, soldadura	1	Glob	50	50
				TOTAL	1.535

1.3 Costo de mano de obra

ITEM	DESCRIPCION	CANT	Nº DIAS	PRECIO UNID.	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Técnico mecánico instalador + electricista (5días)	3	4	40	480
2	Técnico de pruebas	2	2	40	160
3	Supervisor	1	2	150	300
4	Capacitación	1	1	150	150
				TOTAL	1.090

2. DETALLE DE COSTOS DE CONVERSION DE QUEMADOR

2.1 Costo de los equipos

ITEM	DESCRIPCION	CANT	UNID	PRECIO UNID	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Tren de Válvulas	1	Juego	2.000	2.000
2	Estación reductora secundaria	1	Juego	2.500	2.500
3	Chaqueta de inyección de gas	1	Unidad	800	800

2.2 Costo de materiales

ITEM	DESCRIPCION	CANT	UNID	PRECIO UNID	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Cono refractario	1	Unidad	1.000	1.000
2	Tubería mas niplería	1	Glob	200	200
3	Pinturas	1	Glob	50	50
4	Empaquetaduras	1	Glob	20	20
5	Pernos	1	Glob	15	15
6	Cables eléctricos	1	Glob	100	100
7	Tuberías conduit	1	Glob	100	100
8	Conexiones	1	Glob	150	150
9	Consumibles varios, soldadura	1	Glob	50	50
				TOTAL	1.685

2.3 Costo de mano de obra

ITEM	DESCRIPCION	CANT	Nº DIAS	PRECIO UNID.	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Técnico mecánico instalador + electricista (5días)	3	7	40	840
2	Técnico de pruebas	2	2	40	160
3	Supervisor	1	2	150	300
4	Capacitación	1	1	150	150
				TOTAL	1.450

ANEXO G

PLANOS